

Tomi Meriläinen

Laivapotkurit ja hydrodynamiikka

Opinnäytetyö
Merenkulun insinööri

Joulukuu 2017



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tekijä/Tekijät	Tutkinto	Aika
Tomi Meriläinen	Merenkulun insinööri (AMK)	Joulukuu 2017
Opinnäytetyön nimi		
Laivapotkurit ja hydrodynamiikka		48 sivua
Toimeksiantaja		
Xamk		
Ohjaaja		
Alexander Shaub		
Tiivistelmä		
<p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on havainnoida yleisimpien potkurityyppien ominaisuuksia ja niiden valintoihin vaikuttavia tekijöitä, joita eri tyypisissä aluksissa käytetään. Mukana työssä on osa potkurin kehityshistoriaa aina sen keksimisestä nykypäivään saakka. Työssä tarkastellaan myös hydrodynaamisia ominaisuuksia ja voimia, jotka vaikuttavat potkurin ympäristössä. Tarkastellessa itse potkureita huomiota kiinnitetään lapojen muotoon ja niitä kuluttaviin voimiin sekä ilmiöihin. Lisäksi työn tarkoituksena on selventää aluksen muodon merkitystä potkurin tehokkuuteen. Matemaattiset kaavat ja taulukot ovat työssä osana havainnollistamassa fysikaalisia ilmiöitä sekä niiden vaikutuksia potkurin ja aluksen toimintaan.</p>		
<p>Tietoa potkurin muodon merkityksestä, vanavedestä ja hydrodynamiikasta on hankittu kirjallisista lähteistä sekä alan liittyvistä internetlähteistä. Työssä kerrotaan myös Suomessa suoritettavasta tutkimuksesta Valtion Teknologian Tutkimuskeskus VTT Oy:ssä, jossa näitä ilmiöitä pystytään mallintamaan ja testaamaan todellisuutta vastaavissa olosuhteissa.</p>		
<p>Potkurin anatomian ja aluksen hydrodynaamisten ominaisuuksien ymmärtäminen merenkulussa on tärkeä osa-alue. Nykypäivänä yhä suuremmat polttoainetalouden, sekä päästöjen aiheuttamat paineet ovat pysyvästi mukana tässä kehityksessä. Tämän katsauksen avulla lukijan on helpompi ymmärtää potkuria osana propulsiota ja aluksen vaikutusta propulsioon sekä tehokkuuteen.</p>		
Asiasanat		
Potkuri, Lapa, Hydrodynamiikka, Vanavesi, Kavitaatio		

Author(authors)	Degree	Time
Tomi Meriläinen	Bachelor of Marine Technology	December 2017
Thesis title		
Ship propellers and Hydrodynamics		48 pages
Commissioned by		
Xamk		
Supervisor		
Alexander Shaub		
Abstract <p>The objective of this thesis is to observe features and factors of the most common types of propellers and thereby the reasons for choosing them to be used in different types of vessels. The study also considers the propeller history from its invention to the present. Hydrodynamic properties and forces that affect the propeller environment are also under observation in this thesis. Attention is focused on shape of the blades and on the forces and phenomena that wear the propellers. In addition, the purpose of this study is to resolve the importance of the shape of the vessel to propeller efficiency. The mathematical formulas and tables are included to illustrate the physical phenomena as well as their effects on propeller and ship operation.</p> <p>Information about the shape, wake and hydrodynamics of the propellers form has been obtained from literary and from field-related internet sources. The thesis also provides information about the research carried out in Finland at the State Technology Research Center at VVT Oy, where these phenomena can be modeled and tested under realistic conditions.</p> <p>Understanding the propulsion anatomy and the hydrodynamic properties of vessels in shipping is important. Nowadays, the growing pressures caused by fuel economy and emissions are permanently involved in this development. This review enables the reader to comprehend the propeller as part of the propulsion and the impact of the vessel on propulsion and efficiency.</p>		
Keywords		
Propeller, Blade, Hydro dynamics, Wake field, Cavitation		

SISÄLLYS

KÄYTETYT LYHENTEET	5
1 JOHDANTO	8
2 HISTORIA.....	9
2 POTKURITYYPIT	18
2.1 Kiinteälapainen potkuri	18
2.2 Säätolapapotkuri.....	19
3 POTKURIN JA RUNGON GEOMETRIA.....	20
3.1 Yleisesti	20
3.2 Kaltevuus, kierto ja nousu.....	28
3.3 Lapojen määrä ja muotoilu	31
3.4 Säätolapapotkurin geometria	33
3.5 Aluksen aiheuttamat vastavoimat	34
4 VANAVESI.....	35
4.1 Vanavesi etenevässä kappaleessa.....	35
4.2 Vanaveden vaikutus potkuriin	36
5 KAVITAATIO	38
5.1 Yleistä.....	38
5.2 Kavitaatiolajit.....	39
5.3 Potkurimelu.....	42
6 VTT	43
7 YHTEENVETO	44
LÄHTEET.....	46
KUVALUETTELO	

KÄYTETYT LYHENTEET

A	Propulsorin pinta
A_0	Potkurin ympyrän pinta
a_D	Potkurin levitetyn pinta-alan ja ympyrän pinta-alan välinen suhde
a_E	Potkurin oikaistun pinta-alan ja ympyrän pinta-alan välinen suhde
a_p	Potkurin projisoidun pinta-alan ja ympyrän pinta-alan välinen suhde
D	Potkurin halkaisija
d	Navan halkaisija
dS	Aluksen sisään osoittava pintaelementti
\vec{F}	Reaktiovoima
F_p	Propulsorin voima
F_z	Kokonaisnostovoima
F_x	Aluksen kokonaisvastus toimivalla propulsorilla
G	Aluksen painopiste
J	Keskimääräinen etenemisluku
K_{Qb}	Potkurin vääntökerroin vanavedessä
K_{Qo}	Potkurin vääntökerroin avovedessä
K_{To}	Avoveden työntökerroin

MCR	Maximum continuous rating
M_p	Propulsorin momentti
\vec{M}	Alukseen kohdistuva momentti painopisteen ympäri
n	Pyörimisnopeus
\vec{n}	Yksikkövektori suoraan pintaelementtiä dS vastaan
P	potkurin nousu
P_d	Potkurin vaatima teho
P_e	Hitausteho
p	hydrodynaaminen paine
P/D	Suhteellinen lapanousu
Q	Potkurin vääntö
QPC	Lähes työntövoiman kerroin
\vec{q}	Jännitysvektori
R	Aluksen vastus
R_T	Aluksen kokonaisvastus ilman propulsoria
RV_s	Vaikuttava teho
r	Potkurin säde
\vec{r}	Voimavektori aluksen ja pintaelementin välillä
T	Työntövoima

T_o	Potkurin keskimääräinen etenemisluku avovedessä
t	Työntövoiman vähennyskerroin
$\vec{\tau}$	Leikkausjännitys
V	Aluksen nopeus
V_s	Haluttu nopeus
v_a	Aksiaalinen komponentti
v_t	Tangentiaalinen komponentti
v_r	Radiaalinen komponentti
w_t	Taylorin keskimääräinen vanavesikerroin
Z	lajien lukumäärä
ΔR_p	Työnnön vähennys
η_h	Rungon tehokkuuden määrä
η_o	Potkurin hyötysuhde avovedessä
η_r	Suhteellinen pyörimisteho
ϱ	Veden tiheys
θ	Potkurin nousukulma
θ_s	Potkurin kiertokulma

1 JOHDANTO

Potkuri ja aluksen hydrodynamiikka ovat voimakkaasti sidoksissa toisiinsa. Vaikutukset propulsio- ja tehokkuuteen ovat suuria puoleen ja toiseen jo aivan pienilläkin muutoksilla. Kun merenkulussa aikaisemmin keskityttiin aluksen varmatoimisuuteen ja selviytymiseen satamasta toiseen, nykypäivänä huomio on keskittynyt tuotetun energian maksimaaliseen hyötykäyttöön. Tämä tarkoittaa potkureiden ja aluksen muotoilua ja optimoituja ratkaisuja energiankulutuksissa. Lisähaasteita tuo nykyään myös arktinen merenkulku.

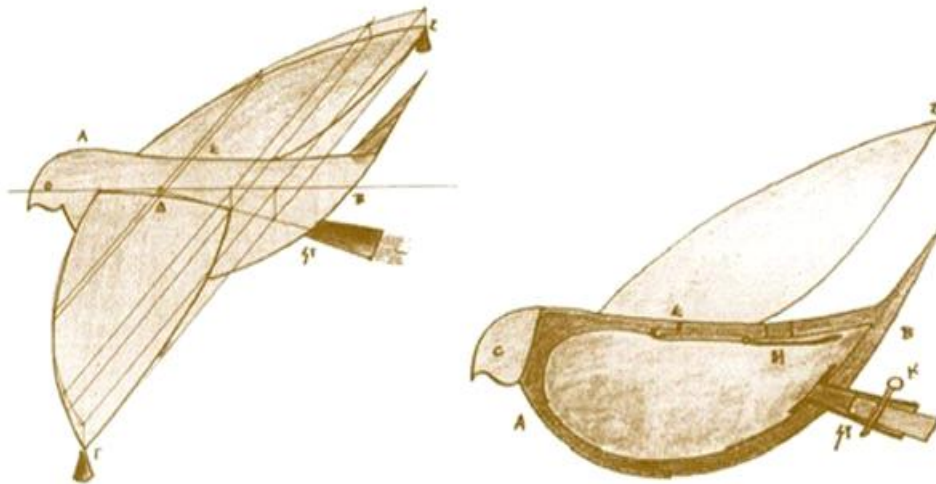
Tämä opinnäytetyö auttaa ymmärtämään perustavanlaatuisia tekijöitä, jotka vaikuttavat potkurin muotoon. Työssä käydään tiiviisti läpi yleisimmät merenkulussa käytetyt potkurityypit ja niiden selkeät ominaisuudet. Lisäksi havainnoidaan aluksen pohjan muotoa ja sen merkitystä potkurin tehoon. Havainnoinnin apuna työn alussa esitellään potkurin kehityshistoriaa syineen ja seurauksineen, jonka jälkeen hyödynnetään matemaattista näkökulmaa avaamaan erilaisten fysikaalisten ilmiöiden ominaispiirteitä. Apuna työssä käytetään myös kuvia, joiden kautta eri ilmiöitä ja niiden vaikutuksia on helpompi ymmärtää. Työssä kerrotaan lisäksi Suomessa tehtävästä tutkimuksesta Valtion Teknologian Tutkimuskeskus VTT Oy:ssä.

Opinnäytetyö on toteutettu XAMK:n merenkulun tutkimus-, kehittämis- ja innovaatiotoiminnan yksikön toimeksiantona. Opinnäytetyön pohjana on käytetty merenkulun laajaa kirjallista materiaalia. Materiaalia on hankittu myös luotettavista alan julkaisuista internetissä, kuten alalla vaikuttavilta konevalmistajilta Wärtsilä ja MAN. Aiheeseen liittyvän tiedon tiivistäminen tähän työhön toi oman haasteensa. Myös ilmiöiden ymmärtäminen niin suomeksi kuin englanniksi vaati runsaasti aiheeseen perehtymistä.

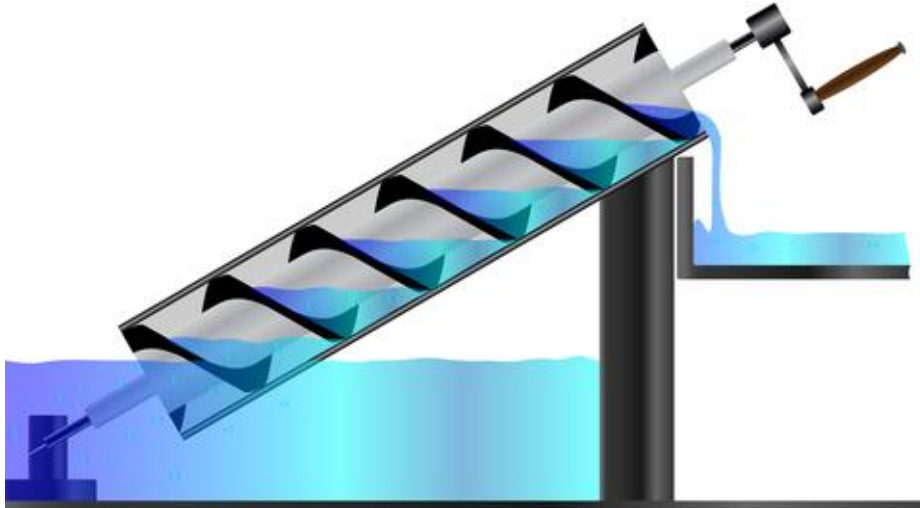
2 POTKURIN HISTORIA

Potkuri on olennainen osa teknologiaa useimmissa vedessä kulkevilla aluksissa, joka on kehittynyt ajan myötä antamaan työntövoimaa koneelliseen merenkulkuun. Koska potkurin toiminta on niin yksinkertaista, se helposti unohtetaan tarkastellessa kokonaisen aluksen toimintakykyä, mutta huolellisella valinnalla ja ylläpidolla voidaan varmistaa aluksen toiminta ja potkurin optimaalinen toiminta.

Potkurin esiaste juontaa juurensa jopa 2500 vuoden taakse, Pythagoraan aikakaudelle, jolloin Etelä-Itäliassa Tarantaksen kaupungista kotoisin oleva insinööri ja mekaanikko Archytas (428 - 350 eaa.) rakensi ensimmäisen mekaanisen lentolaitteen jäljitellen lintua. Lähemmäs nykypäivän potkurin muotoa tultiin vuosisata myöhemmin, kun Archimedes kehitti laitteen auttamaan veden pumppauksessa, joka tunnetaan vieläkin Arkhimedeen ruuvina. (Stanford Encyclopedia of Philosophy, Carlton 2007, 3).



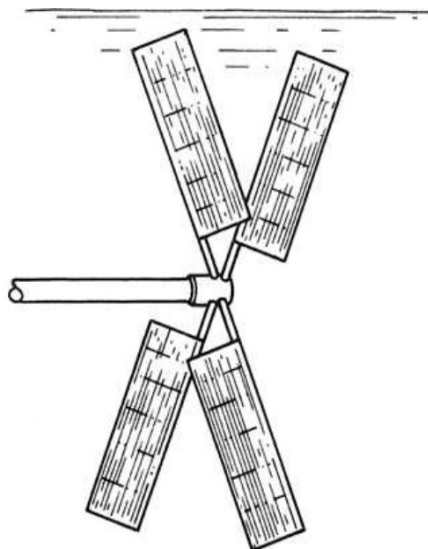
Kuva 1. Archytaksen lintu (Understanding the history and Evolution of Robotics).



Kuva 2. Arkhimedeen ruuvi (Screw pump basics).

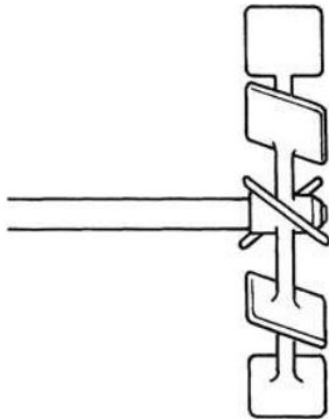
Kuuluisan italialaisen taiteilijan ja keksijän Leonardo Da Vincin tiedetään mallintaneen ruuvipotkurin muotoja hänen teoreettisessa lentokoneessaan, joka julkaistiin noin 400 vuotta ennen varsinaista lentämisen keksimistä. (Matusjak 2005, 5.)

Yhdistelmä Arkhimedeen ruuvista ja vuosisatojen ajalta hankitusta soutamisen ja melomisen tietämyksestä kulminoitui useimpiin teknologisiin läpimurtoihin, joista ehkä merkittävin on vuonna 1661 englantilaiset Thomas Toogood:n ja James Hays:n patentoima eräänlainen vesisuihkutustyöntölaite. Tästä muutamaa vuotta myöhemmin englantilainen fyysikko Robert Hooke kehitti propulsiojärjestelmää, joka imitoi tuulimyllyä. (Carlton 2007, 3; Wärtsilä Technical Journal).



Kuva 3. Hooken ruuvipotkuri (Carlton 2007, 3).

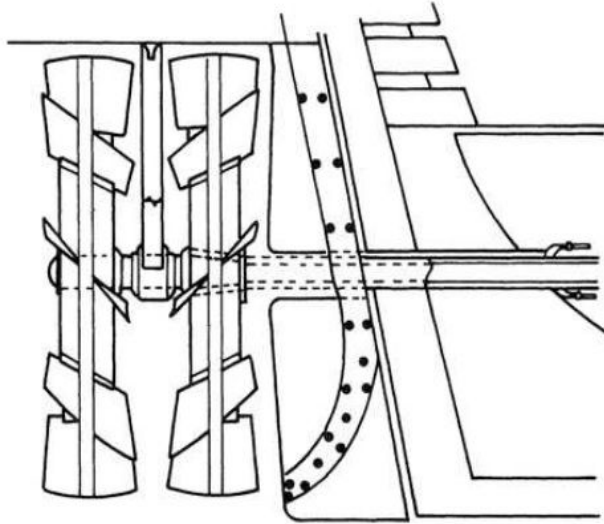
Vuonna 1752 Académie des Sciences Pariisissa tarjosi palkkioita tutkimuksista, jotka johtavat merkittäviin kehityksiin laivan rakennuksessa. Euroopan tiedemiehet ja matemaatikot kiinnostuivat tästä tarjouksesta, ja lopulta voiton vei Alankomaalainen Daniel Bernoulli potkuripyörä-keksinnöllään. (Carlton 2007, 3.)



Kuva 4. Bernoullin potkuripyörä (Carlton 2007, 3).

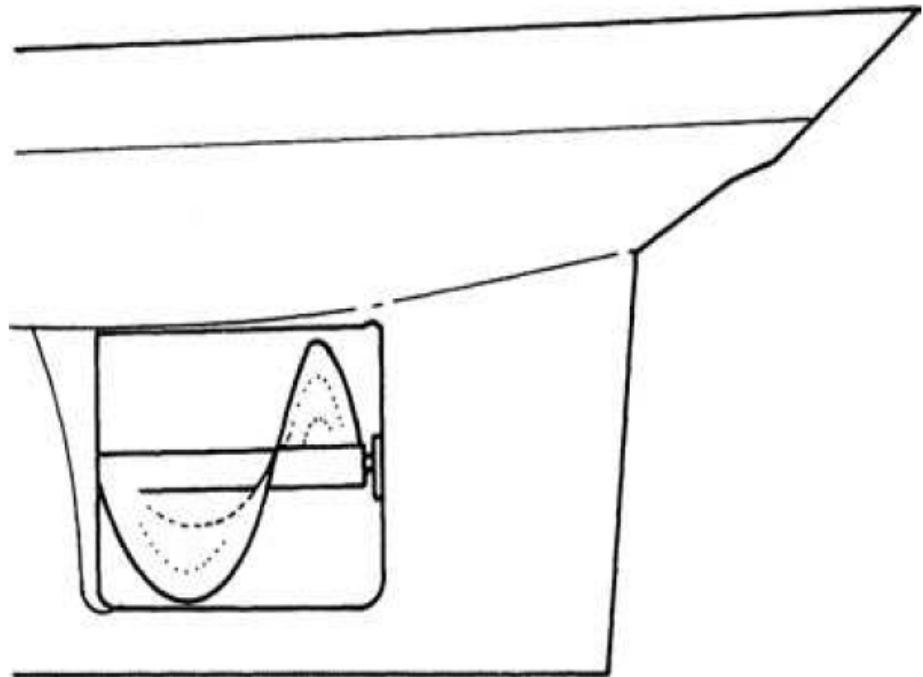
Tämän jälkeen testattiin erilaisia potkureita ympäri Eurooppaa. Lapojen määrä vaihteli kahdesta useampaan ja voimantuottona käytettiin aluksi miehistöä pyörittämään akselia, kunnes höyrykoneet alkoivat yleistyä. (Carlton 2007, 3.)

Seuraava, nykypäivänäkin merkittävä keksintö tehtiin vuonna 1824, kun ranskalainen keksijä Dollman esitti vastakkain pyörivän potkurin. Tätä keksintöä kehitti eteenpäin entinen ruotsin armeijan upseeri John Ericsson, joka patentoi suunnittelemansa propulsiojärjestelmän vuonna 1836 (Kuva 5). Tämä ei kuitenkaan lyönyt itseään tuolloin vielä läpi. Esitellessään Thamesjoella aluksen suorituskykyä Eglannin amiraliteetille oli Ericsson sijoittanut potkurin aluksensa peräsimen taakse, joka huomattavasti heikensi ohjattavuutta ja veden virtausta potkurille. (Carlton 2007, 3-4).



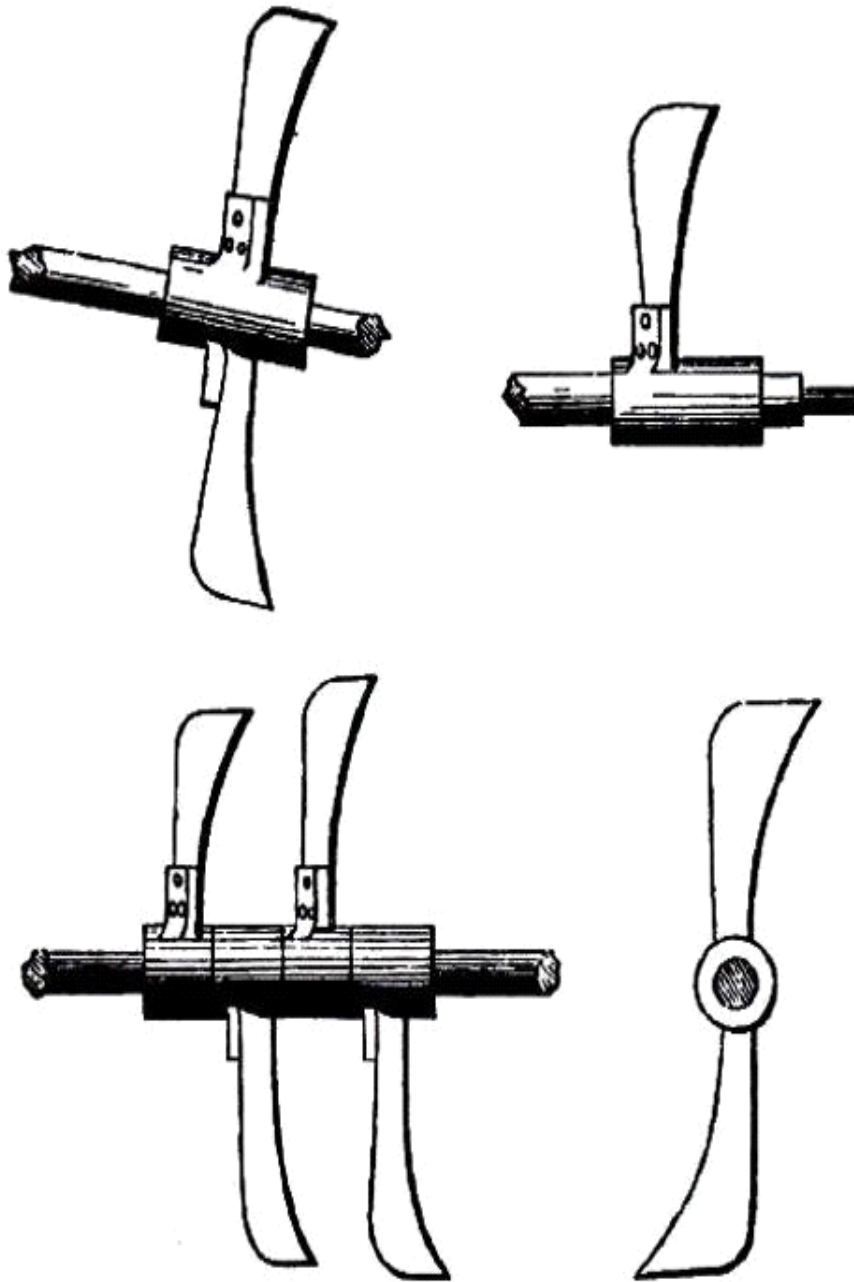
Kuva 5. Ericssonin vastakkain pyörivä potkuri (Carlton 2007, 5).

Pian epäonnistuneen demonstraation jälkeen hän muutti Yhdysvaltoihin ja alkoi suunnitella uutta potkurityyppiä, joka imitoi Archimedees ruuvia. Poliittiset sekä taloudelliset syyt johtivat kuitenkin siihen, että englantilaisen Francis Petit Smith:n kehittämä vastaavanlainen potkurityyppi nousi parempaan suosioon amiraliteetin silmissä. Versio otettiin käyttöön Archimedes-nimisessä aluksessa (Kuva 6). (Carlton 2007, 5-6).



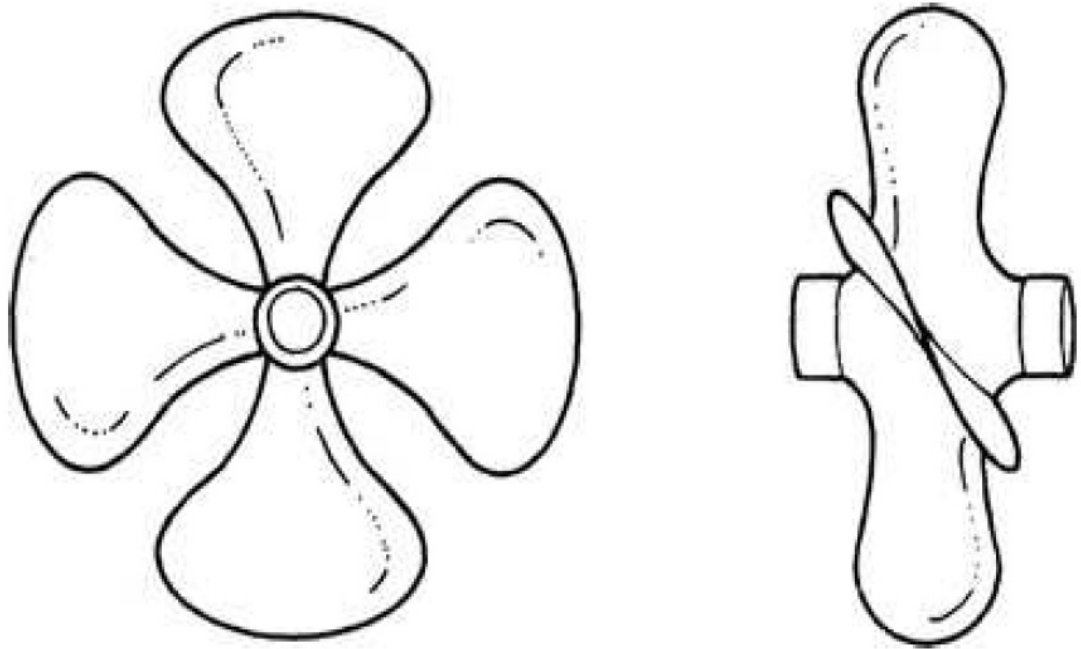
Kuva 6. Arkhimedees potkuri (Carlton 2007, 6).

Vuonna 1838 James Lowe patentoi potkurin, joka on noteerattu ensimmäisenä potkurityyppinä, jota vielä nykyäänkin käytetään. Ensimmäisenä se asennettiin alukseen nimeltä S.S Novelty. (Carlton 2007, 6.)



Kuva 7. Lowen irroitettavat potkurilavat (Lowe's Forms of Curved Blades for Propelling).

Enemmän nykyaikaista muotoilua muistuttava potkuri asennettiin Napoleon-nimiseen ranskalaiseen postialukseen vuonna 1842. Tähän muotoon päätymistä edelsi sarja erilaisia mallitestejä, joissa testattiin ja muunneltiin potkurin halkaisijaa, lapakulmaa, lapojen pinta-alaa ja lapojen määrää. (Carlton 2007, 6-7).

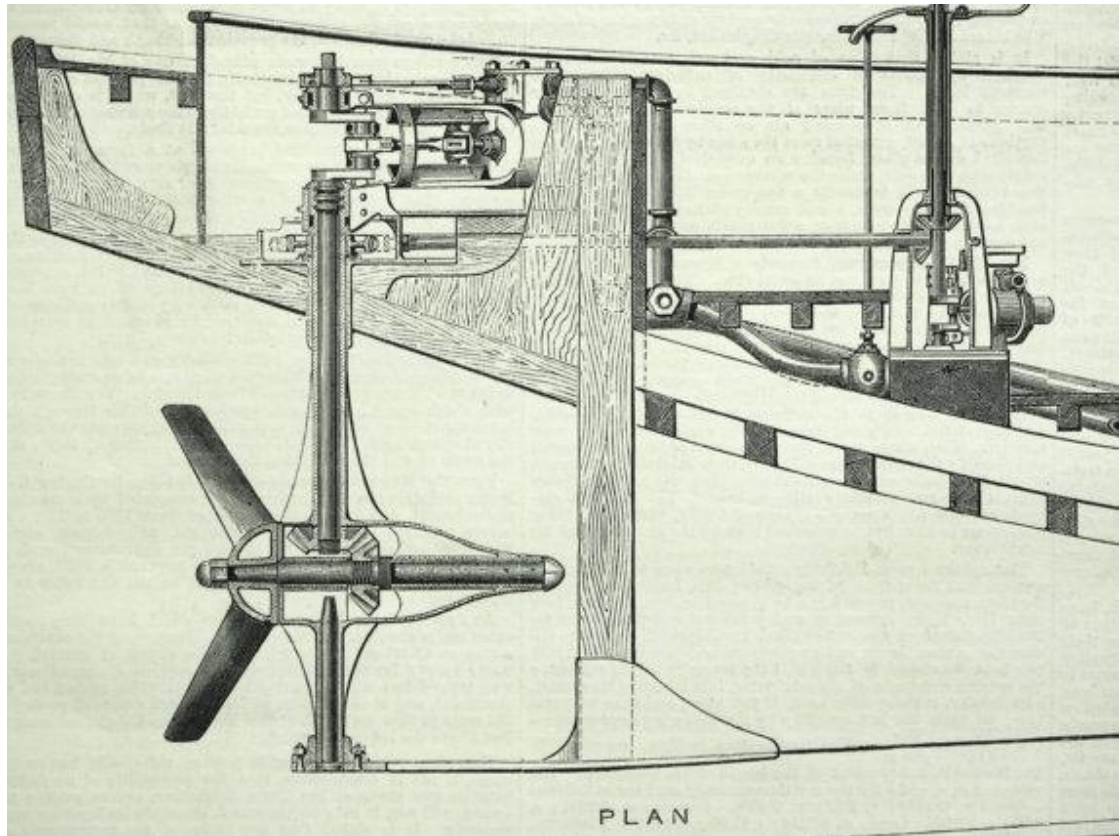


Kuva 8. Napoleon-laivan potkuri (Carlton 2007, 6).

Tuohon aikaan yleisesti alusten pääasiallisena propulsiotyyppinä toimivat siipirattaat sekä purjeet. Eri potkurivariaatioita testattiin laajalti ympäri Eurooppaa. Esimerkiksi ensimmäinen versio säätölapapotkurista nähtiin vuonna 1832. Tuohon mennessä lapakulman säätöön oli kyetty vain manuaalisesti irrottamalla ja uudestaan kiinnittämällä lavat haluttuun kulmaan. Ensimmäinen ratkaisu ruuvipotkurin eduksi tapahtui maaliskuussa 1845. Siihen mennessä sisaraluksia HMS Alectoa ja HMS Rattleria oltiin ehditty testata ja verrata keskenään erilaisilla koeajoilla. Alecto edusti siipiratasaluksia ja kisan voittanut Rattler oli varustettu kaksilapaisella ruuvipotkurilla. Rattlerin voitto vakuutti amiraliteetin siinä määrin, että he tilasivat seitsemän fregattia varustettuna ruuvipotkureilla. (Carlton 2007, 7-8.)

Purjeitten yleinen käyttö vaikuttikin osaltaan potkureiden suunnitteluun. Esimerkiksi Vuonna 1846 Joseph Maudslay patentoi potkurin, joka voitiin irrottaa veden vastuksen minimoiseksi, kun liikkuminen tapahtui purjeilla. Kun potkurin irrottaminen ja nostaminen todettiin pian vaivalloiseksi, vuonna 1848 John Seaward patentoi potkurityypin, jossa lavat voitiin taittaa potkuriakselin suuntaisesti. 17 vuotta myöhemmin 1865 P.A. Forthergill visioi oman ratkaisunsa ongelmaan. Siinä potkurin lavat oli järjestetty viuhkamaiseen muotoon ja tarvittaessa ne voitiin sulkea. (Carlton 2007, 7-8.)

Nykypäivän kannalta merkittävän keksinnön teki William H. Mallory vuonna 1878. Hän patentoi ensimmäisen azimuth-ruoripotkurin. Kannelle sijoitetun höyrykoneen voimansiirto potkurille tapahtui mekaanisesti kartiohammaspyörien avulla. (Carlton 2007, 10.)

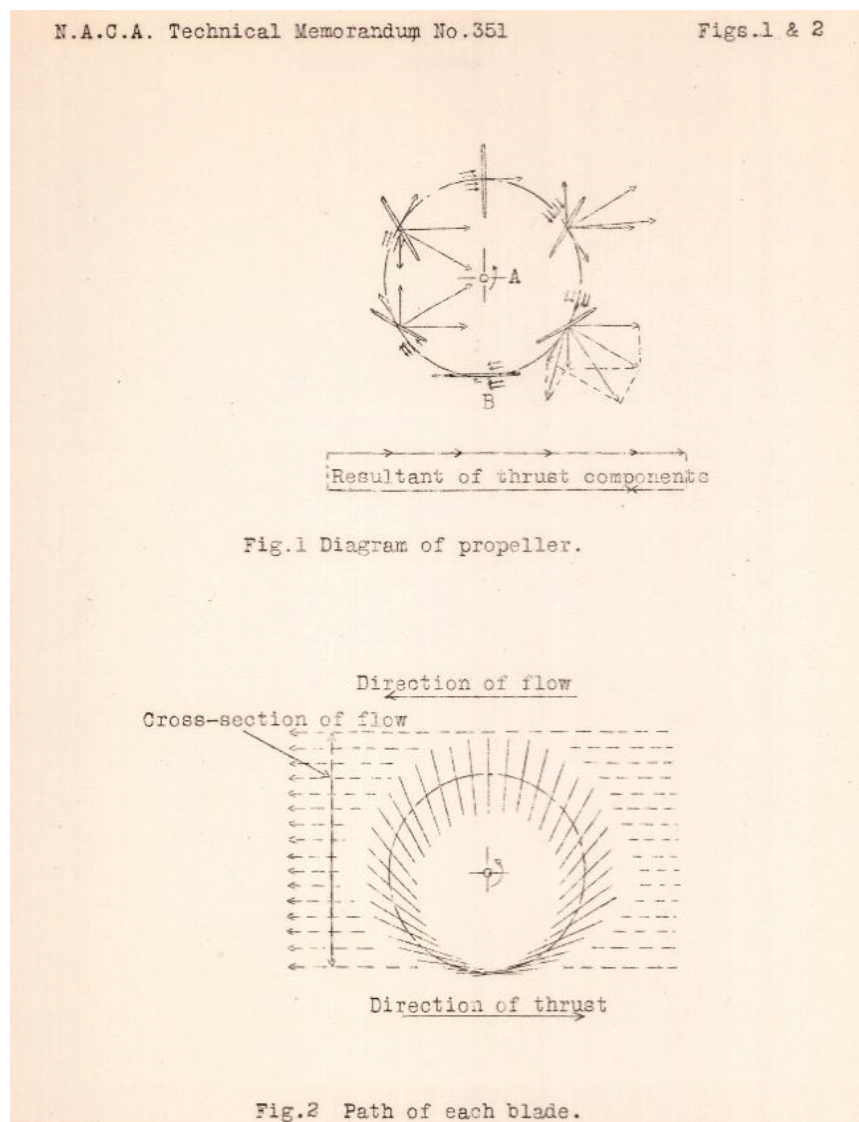


Kuva 9. Malloryn ruoripotkuri (Antique Print of the Mallory Propeller - 1878).

Lähestyttäessä 1900-lukua potkurin lapojen muotoa, määrää, kulmaa, sekä järjestystä ja näiden vaikutusta kavitaatioon tutkittiin yhä enemmän. Myös teoreettisia menetelmiä alettiin ottaa käyttöön tutkimuksissa selittämään fyysisiä havaintoja. Merkittävimpiä tutkijoita olivat William John Macquorn Rankine ja William Froude, jotka kehittivät lapaelementtiteorian (Blade Element Theory). Sen avulla pystytään laskennallisesti arvioimaan tarvittu momentti potkurin pyörittämiseen. Teoria on nykypäivänä merkittävä työväline laivojen suunnittelussa ja kehittämisessä. Kavitaation aiheuttaman värähtelyn sekä potkurin tehokkuuden tutkiminen oli viime vuosisadan tärkeimpiä kohteita lapojen muotoilun osalta. Potkurien koko kasvoi jatkuvasti laivojen koon ja koneiden tehokkuuden kanssa. Lapojen materiaaleja tutkittiin laajalti käyttökohteiden ja toiminta-alueiden vaatimusten mukaan. Silti kehitys oli varsin hidasta vielä ennen tietokoneiden yleistymistä. Laskentatehon

lisääntyessä potkureita ja käytettyjä materiaaleja voitiin tutkia huomattavasti laajemmin tietokoneohjelmien ansiosta. (Carlton 2007, 10-11.)

Ruuvipotkurin kehityksen aikana 1900-luvulla kehitettiin myös uusia potkurityyppejä. Vuonna 1928 esiteltiin ensimmäinen versio vertikaaliakselipotkurista Kirsten – Boeing:n toimesta. Nykyään tunnetuin kyseinen potkurityyppi tunnetaan Voith – Schneider – potkurina. (Ghose & Gokarn 2004, 412.)



Kuva 10. Kirsten-Boeing potkuri (N.A.C.A.).

Viimeisiin merkittävä innovaatio potkureiden osalta tehtiin vuonna 1936, kun saksalainen Ludwig Kort patentoi suulakepotkurin. Siinä työntövoimaa saadaan enemmän potkuria ympäröivän suulakkeen ansiosta. (Matusiak 2005, 5.)

Feb. 11, 1936.

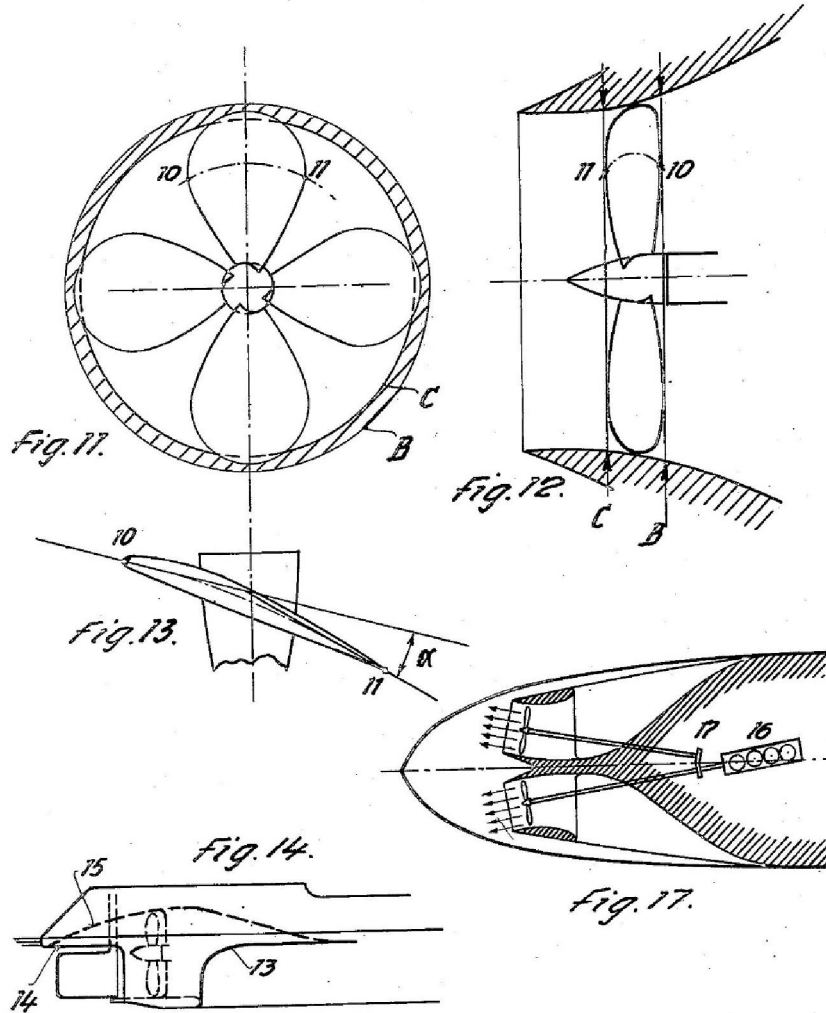
L. KORT

2,030,375

COMBINED DEVICE OF A SHIP'S PROPELLER ENCLOSED BY A NOZZLE

Filed Sept. 7, 1933

3 Sheets-Sheet 2

L. Kort
INVENTORBy: *Markes & Clerk*
Attys.

Kuva 11. Patentoitu suulakepotkuri (Combined Device of a Ship's Propeller Enclosed by a Nozzle).

2 POTKURITYYPIT

Merenkulussa käytetyimmät potkurityypit ovat kiinteälapaiset potkurit ja säätölapapotkurit. Niiden laaja kirjo antaa paljon erilaisia mahdollisuuksia valita oikeanlainen propulsio. Valintaan eniten vaikuttavat asiat ovat aluksen liikennealue, merimatkojen pituus, vaadittu ohjailukyky, sekä potkurityypin hinta ja tulevat huoltokustannukset. Nykypäivänä energiatehokkuus, ympäristöystävällisyys ja niiden tuomat vaatimukset ovat huomionarvoisia asioita, jotka suosivat mainittujen potkurityypien käyttöä. Muita vaihtoehtoja propulsiolle ovat erilaiset ruoripotkurilaitteet ja suulakepotkurit, joita on laajalti käytössä hinaajissa, jäänmurtajissa ja losseissa, joissa ohjailukyky on tärkeintä. Potkurin lavat ovat niissä joko kiinteästi asennettuina tai säädettävää mallia, ja tässä työssä tarkastelu rajataan näihin yleisesti käytössä oleviin tyypeihin. (Carlton 2007, 36–37; MAN Diesel&Turbo; Bertram 2000, 37).

2.1 Kiinteälapainen potkuri

Kiinteälapaiset potkurit ovat valettuja kappaleita, joiden muoto tai koko ei ole enää valmistamisen jälkeen muutettavissa. Lapojen lukumäärä valamisen jälkeen on myös pysyvä. Määrä vaihtelee yleensä kahdesta seitsemään, mutta sota-aluksissa erityistarpeiden vuoksi voidaan käyttää potkureita, jossa lapamäärä on suurempi. Kauppa-aluksissa yleisesti käytetty lapojen määrä on neljästä kuuteen, ja pienemmissä aluksissa suositaan potkureita kahdella tai kolmella lavalla varustettuina. Yleisiä valmistusmateriaaleja ovat käyttökohteesta ja propulsiotyypistä riippuen ruostumaton teräs, seosmetallit kuten pronssi ja pienemmän kokoluokan potkureissa komposiittiseokset kuten hiilikuitu. Kiinteälapaisten potkureiden etuja ovat edullisuus, tehokkuus, yksinkertaisuus ja huoltovapaus. Suurimpana haittapuolena tämän tyyppisissä potkurissa on huono ohjailtavuus. (Carlton 2007, 36–39, 464; MAN Diesel&Turbo.)

2.2 Säätolapapotkuri

Säätolapapotkurit ovat useista eri komponenteista rakennettuja potkureita.

Lavat ovat irrotettavia, mutta myös jatkuvasti säädettäviä, minkä ansiosta laivan nopeutta sekä suuntaa on mahdollista muuttaa portaattomasti.

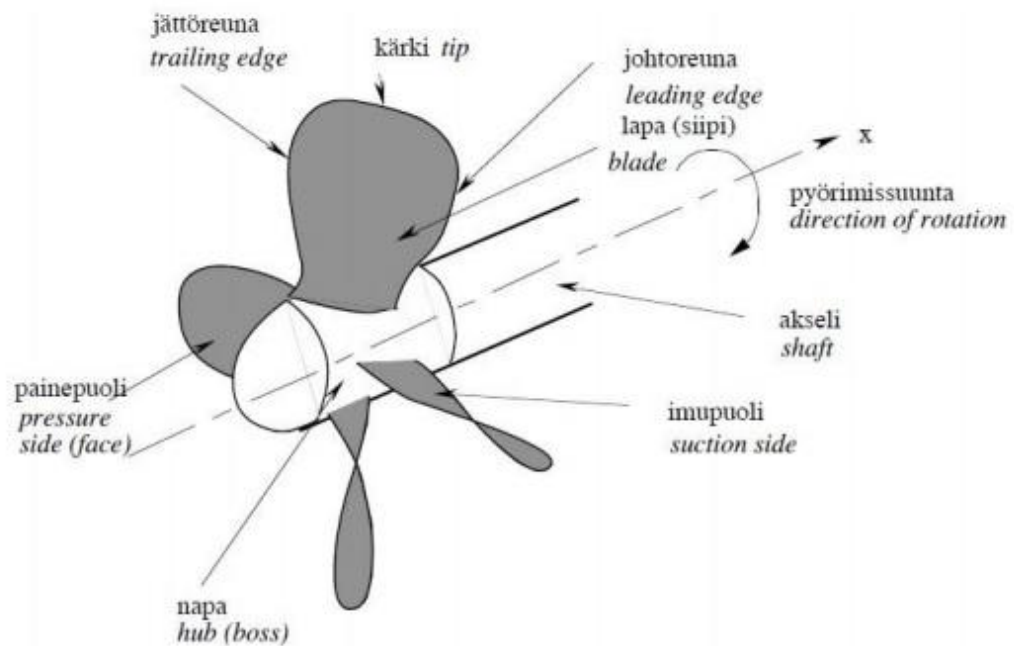
Säätolapapotkureiden huomattavia etuja ovat ohjailtavuus ja hyvä pysähtymisominaisuus. Haittapuolia ovat monimutkaisuus, korkeampi hinta ja suurempi huollon tarve. (Carlton 2007, 43–45, 464.)

Huolimatta säätolapapotkurin heikommasta hydrodynaamisesta hyötysuhteesta verrattuna kiinteälapaiseen potkuriin, on se erittäin yleinen potkurityyppi merenkulussa. Jo mainittujen etujen lisäksi säätolapapotkurin nousun jatkuva säätäminen mahdollistaa monipuolisemmat koneistoratkaisut ja potkuriakselin vakiopyörimisnopeuden. Vakionopeuden ansiosta koneistoon on mahdollista liittää akseligeneraattori, joka taas lisää taloudellisuutta huomattavasti. (Matusiak 2005, 35-36).

3 POTKURIN JA RUNGON GEOMETRIA

3.1 Yleisesti

Potkuri on siipipyörä, jossa tietty määrä siipien muotoisia lapa on kiinnitetty samaan akseliin tietyssä kulmassa (Kuva 12). Pyöriessään se noudattaa Newtonin kolmatta, voiman- ja vastavoiman lakia, muodostaen vetovoiman, jossa vesi kulkeutuu ensin ylös ja sitten alas saaden näin aikaan aluksen liikkumisen. (Nasa.)



Kuva 12. Kuvaus ruuvipotkurista (Matusiak 2005, 12).

Monimutkainen potkurigeometria koostuu monesta eri osa-alueesta mitä tarkemmin geometriaa pilkotaan pienempään tarkastelukohteeseen, sitä tarkempi on myös tutkinnan tulos. Käytännössä potkuria voidaan tarkastella seuraavilla suureilla:

D potkurin halkaisija

d navan halkaisija

Z lapojen lukumäärä

P potkurin nousu

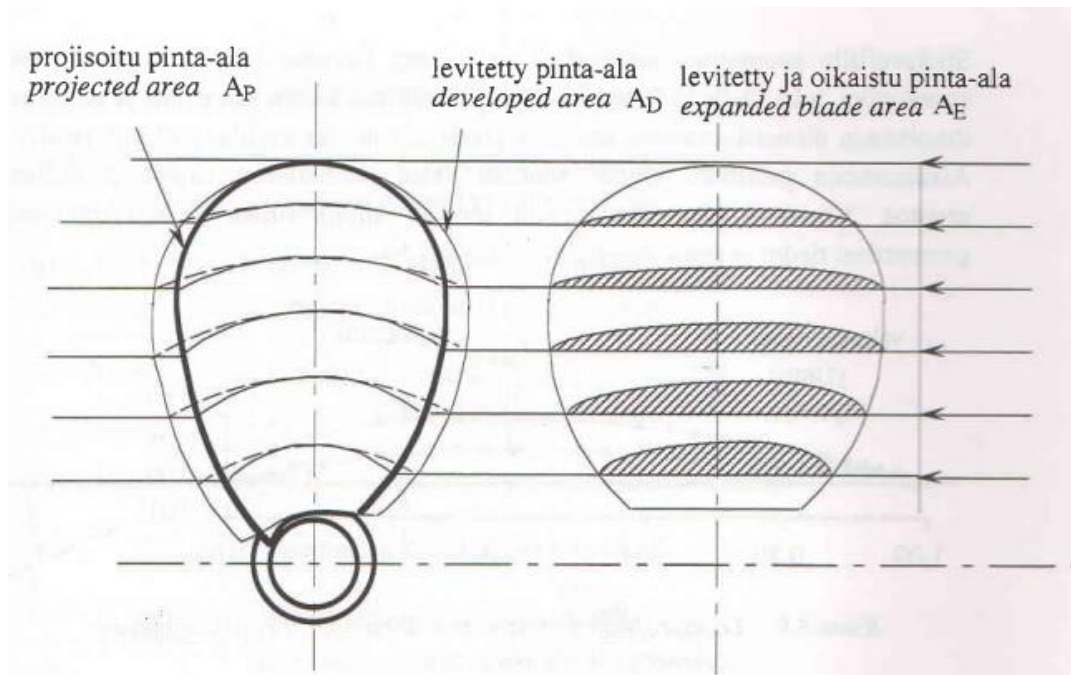
$A\theta$ potkurin ympyrän pinta

$a_p = A_p / A\theta$ potkurin projisoidun pinta-alan ja ympyrän pinta-alan välinen suhde

$a_D = A_D / A\theta$ potkurin levitetyn pinta-alan ja ympyrän pinta-alan välinen suhde

$a_E = A_E / A\theta$ potkurin oikaistun pinta-alan ja ympyrän pinta-alan välinen suhde.

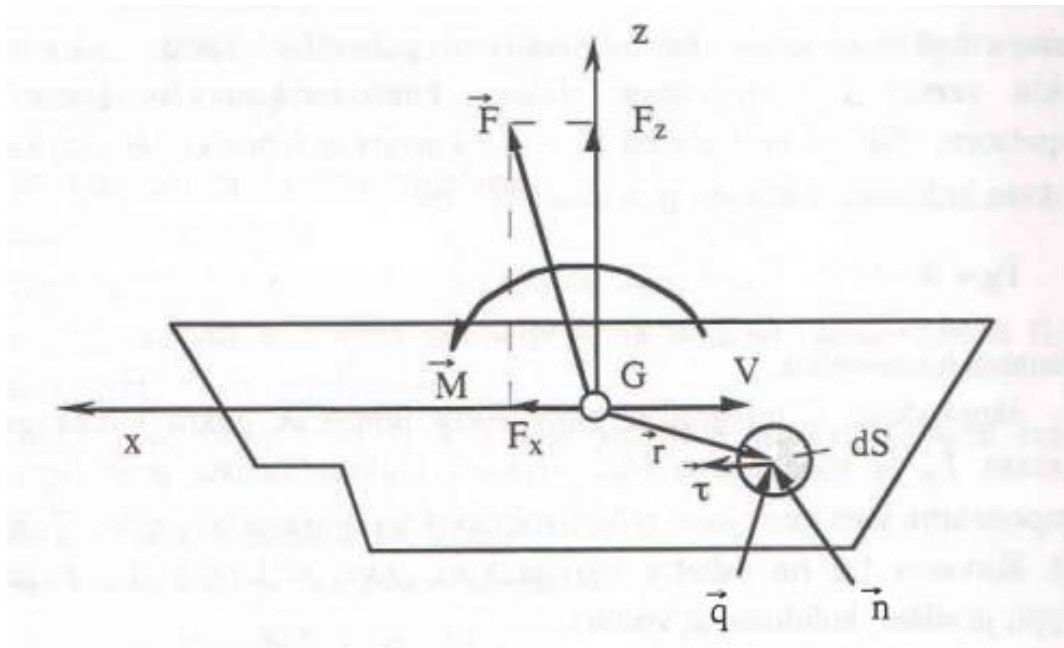
(Bertram 2000, 37; Matusiak 2005, 18-19).



Kuva 13. Potkurin pintageometria. (Matusiak 2005, 17).

Matusiakin (Matusiak 2005, 1) mukaan, laivan käyttäytymiseen vaikuttavat monet ilmiöt, kuten tuulet, aallokot, merivirrat, matala vesi ja toiset alukset. Laivan hydrodynaaminen suunnittelu aloitetaan stabiilista ideaalilanteesta, jossa vakionopeuksinen alus etenee tyynessä vedessä ilman sortokulmaa. Mekaanikan lakeja noudattaen aluksen nopeus on vakio, kun kaikkien alukseen kohdistuvien voimien ja momenttien summa on nolla. Nämä voimat ovat:

- Aluksen painovoima
- Ympäristön eli veden ja ilman aiheuttamat voimat, jotka kohdistuvat aluksen pintaan (pinta-ala ilman propulsorin osuutta).
- Ympäristön aiheuttamat voimat, jotka kohdistuvat aluksen propulsorin pintaan.



Kuva 14. Laivan runkoon vaikuttavat hydrodynaamiset voimat (Matusiak 2005, 1).

Kuvan14. voimat ovat:

- dS Aluksen sisään osoittava pintaelementti
- \vec{F} Reaktiovoima
- F_z Kokonaisnostovoima
- F_x Aluksen kokonaisvastus toimivalla propulsorilla
- G Aluksen painopiste
- \vec{M} Alukseen kohdistuva momentti painopisteen ympäri
- \vec{n} Yksikkövektori suoraan pintaelementtiä dS vastaan
- p hydrodynaaminen paine (hydrostaattinen paine + pinta-aallon muodostumisesta johtuva painekomponentti)
- \vec{q} Jännitysvektori ($\vec{q} = \vec{\tau} + p$)
- \vec{r} Voimavektori aluksen ja pintaelementin välillä
- $\vec{\tau}$ Rungon ja veden välinen kitka eli leikkausjännitys
- V Aluksen nopeus, joka on vakio. (Matusiak 2005, 1-2).

Kuten Matusiak (Matusiak 2005, 2) ilmaisee; Jännityksen \vec{q} integrointi aluksen pintaa pitkin (pinta ilman propulsorin osuutta) johtaa reaktiovoimaan \vec{F} ja -momenttiin \vec{M} aluksen painopisteen G suhteen kaavan 1 mukaisesti

$$\vec{F} = \int_S \vec{q} dS, \vec{M} = \int_S (\vec{r} \times \vec{q}) dS. \quad (1)$$

jossa \vec{q} on jännitysvektori, dS pintaelementti ja \vec{r} voimavektori.

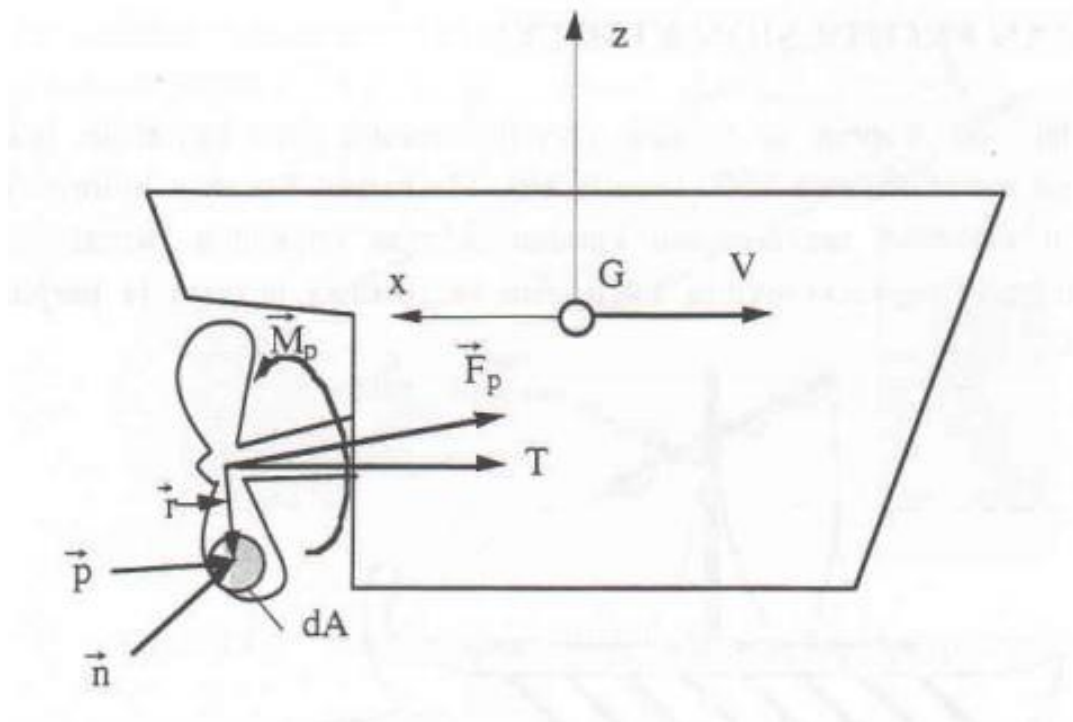
Reaktiovoiman pystysuoraa komponenttia F_z kutsutaan uppouman kokonaisnostovoimaksi. Tämän voiman ja hydrostaattisen uppouman nostovoiman Δ :n erotusta kutsutaan dynaamiseksi nostovoimaksi. Uppouma-

aluksien kohdalla dynaaminen nostovoima ja momentti \vec{M} ovat yleensä merkityksettömän pieniä. Reaktiovoiman \vec{F} aluksen kulkusuuntaista komponenttia F_x kutsutaan "aluksen kokonaisvastukseksi toimivalla propulsorilla". Tämä vastus on yleensä verrattain suurempi, kuin "aluksen kokonaisvastus R_T ilman toimivaa propulsoria". Niiden erotusta eli $F_x - R_T$ kutsutaan työnnon vähennykseksi ΔR_p . Aluksen kokonaisvastuksen ja nopeuden tuloa kutsutaan hitaustehoksi P_E ja ilmaistaan kaavalla 2

$$P_E = R_T V \quad (2)$$

missä R_T on kokonaisvastus ja V nopeus.

Matusiak (Matusiak 2005, 2-3) jatkaa vielä; Jännityksen \vec{q} integrointi propulsorin pintaa A pitkin johtaa propulsorin voimaan \vec{F}_p ja momenttiin \vec{M}_p . Aluksen kulkusuuntaista propulsorin voiman komponenttia kutsutaan joko työntövoimaksi tai lyhyeksi työnnoiksi T . Kuvassa 15 on esitetty laivan yleisin propulsorin tyyppi, ruuvipotkuri ja siihen kohdistuvat voimat.



Kuva 15. Laivan potkuriin vaikuttavat voimat (Matusiak 2005, 3).

Vakionopeudella kulkevan aluksen kulkuvastuksen F_x ja propulsorin työnnön T täytyy olla yhtä suuria, eli:

$$F_x = R_T + \Delta R_p = T \quad (3)$$

jossa R_T on kokonaisvastus ja ΔR_p työnnön vähennys.

Propulsion määritelmänä voidaan ajatella aluksen kulkuvastuksen kumoamiseen ja kiihdytykseen vaadittavien voimien summaa. Laivan kiihdytyksellä tarkoitetaan potkurin aiheuttamaa nopeuden lisääntymistä väliaineessa eli vedessä.

Aluksen suorituskyvyn propulsiokertoimet muodostavat olennaisen yhteyden todellisen tehon ja potkuria pyörittävän tehon välillä, kun alusta vaaditaan kulkemaan eteenpäin halutulla nopeudella tietyllä vastuksella.

Potkurin vaativa ja eteenpäin työntävä teho P_D aluksen halutulla nopeudella V_s on kaavan 4 mukainen

$$P_D = 2\pi nQ \quad (4)$$

missä n ja Q on potkurin pyörimisnopeus ja vääntö.

Pyörittävä vääntö Q voidaan ilmaista nyt kaavalla 5

$$Q = K_{Qb} \varrho n^2 D^5 \quad (5)$$

missä K_{Qb} on potkurin vääntökerroin, kun se toimii aluksen takana vanavedessä keskimääräisellä etenemisluvulla J , ϱ veden tiheys, n pyörimisnopeus ja D potkurin halkaisija.

Työntävä teho P_D voidaan ilmaista yhdistämällä kaavat (4) ja (5) kaavaksi 6

$$P_D = 2\pi K_{Qb} \varrho n^3 D^5 \quad (6)$$

Jos potkuri toimii avovedessä samalla keskimääräisellä etenemisluvulla J , niin

vääntökerroin K_{Qo} hieman muuttuu. Vääntökertoimien suhdetta kutsutaan suhteelliseksi pyörimistehoksi η_r ja ilmoitetaan kaavalla 7

$$\eta_r = \frac{K_{Qb}}{K_{Qo}} \quad (7)$$

jossa K_{Qb} on vääntökerroin vanavedessä ja K_{Qo} on vääntökerroin avovedessä.

Nyt työntävä teho P_D voidaan ilmaista suhteellisella pyörimisteholla yhdistämällä kaavat (6) ja (7) kaavaksi 8

$$P_D = 2\pi n \frac{K_{Qb}}{\eta_r} q n^3 D^5 \quad (8)$$

Nyt vaikuttava teho P_E voidaan määritellä kaavaksi 9

$$P_E = RV_s = P_D QPC \quad (9)$$

missä RV_s on vaikuttava teho ja QPC lähes työntövoiman kerroin.

Tästä yhdistämällä edellä mainitut kaavat (8) ja (9) voidaan vaikuttava teho ilmaista kaavalla 10

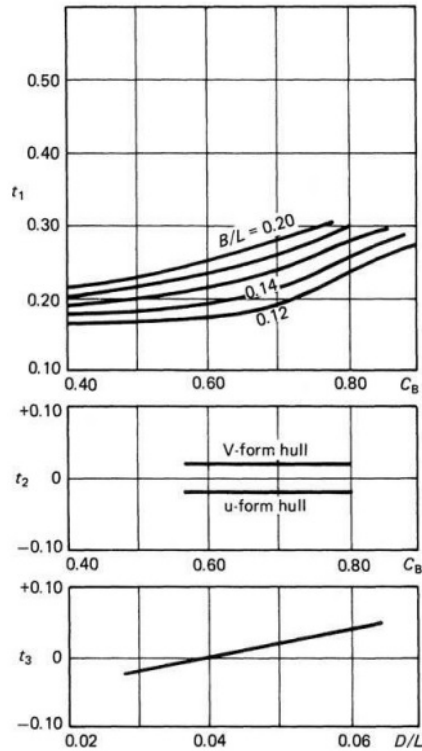
$$RV_s = P_D QPC = 2\pi n \frac{K_{Qb}}{\eta_r} q n^3 D^5 QPC \quad (10)$$

mikä merkitsee, että lähes työntövoiman kerroin QPC voidaan ilmaista kaavalla 11

$$QPC = \frac{RV_s \eta_r}{2\pi K_{Qo} q n^3 D^5} \quad (11)$$

Nyt aluksen vastus R voidaan ilmaista potkurin työntönä T , kuten $R = T (1 - t)$, missä t on työntövoimakkuuden vähennyskerroin. Työntövoiman vähennyskerroin t voidaan määrittää monella eri tavalla. Eräs vaihtoehto laskemiseen on Harvaldin lähestymistapa, joka käsittää kolme erillistä komponenttia seuraavasti $t = t_1 + t_2 + t_3$, missä t_1 , t_2 ja t_3 ovat perusarvoja rungosta, rungon muodon korjauksesta ja vastaavasti potkurin halkaisijan

korjauksesta. Arvot yksipotkuriselle alukselle näkyy alla olevasta taulukosta. (Carlton 2007, 310).



Kuva 16. Työntövoiman vähennyskertoimia (Carlton 2007, 312).

Työntövoiman vähennyskertoimet ovat luokkaa:

- $t = 0.6w$ yksipotkurisille aluksille
- $t = 1.25w$ kaksipotkurisille aluksille,

w :n ollessa vanavesikerroin. (Matusiak 2005, 47)

Aluksen nopeus V_s voidaan määrittää keskimääräisellä etenemisnopeudella

$V_a = V_s (1 - w_t)$, missä w_t on keskimääräinen Taylorin vanavesikerroin.

Edelleen, kun avoveden työntökerroin K_{To} ilmaistaan $T_o = K_{To} \rho n^2 D^4$, missä T_o on avovedessä toimivan potkurin keskimääräinen etenemisluku J ,

$$\frac{T_o}{K_{To}} = \rho n^2 D^4,$$

tästä voidaan ilmaista QPC

$$QPC = \frac{T_o(1 - t)V_a K_{To} \eta_r}{(1 - w_t) 2\pi K_{Qo} n D T_o'}$$

missä η_r on potkurin pyörimishyötysuhde.

Kaava supistettuna on:

$$QPC = \frac{(1-t)}{(1-w_t)} \eta_o \eta_r$$

missä η_o kuvaa potkurin avoveden hyötysuhdetta ja voidaan ilmoittaa muotoon:

$$\eta_o = \frac{J}{2\pi} \frac{K_{To}}{K_{Qo}} \quad (\text{Carlton 2007, 310, kaava 6.8})$$

Rungon tehokkuuden määrä η_h on $(1-t)/(1-w_t)$, joten QPC voidaan tästä määritellä:

$$QPC = \eta_h \eta_o \eta_r. \quad (\text{Carlton 2007, 310, kaava 12.41})$$

tai vaikuttavan ja eteenpäin työntävän tehon termeillä:

$$P_E = P_D QPC,$$

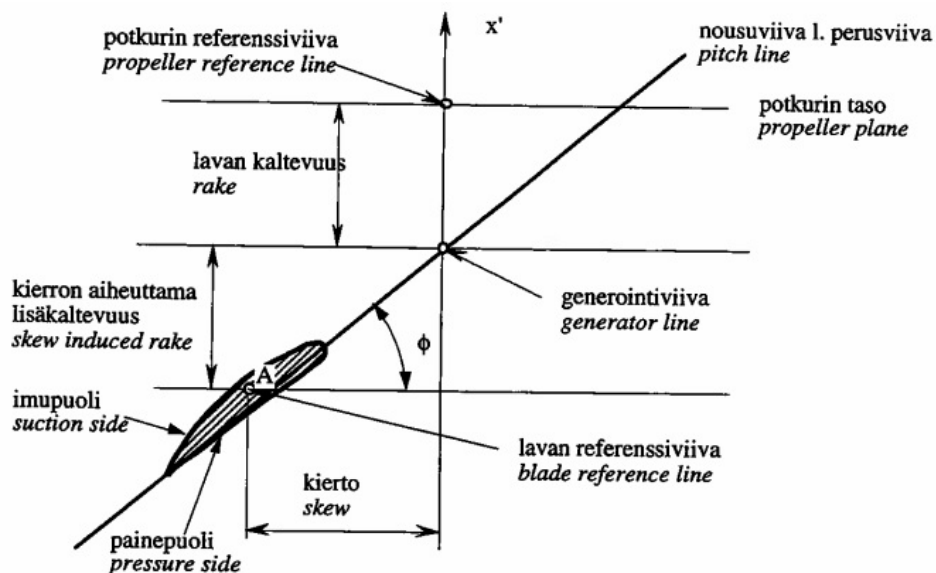
joka on:

$$P_E = P_D \eta_h \eta_o \eta_r. \quad (\text{Carlton 2007, 310, kaava 12.42})$$

3.2 Kaltevuus, kierto ja nousu

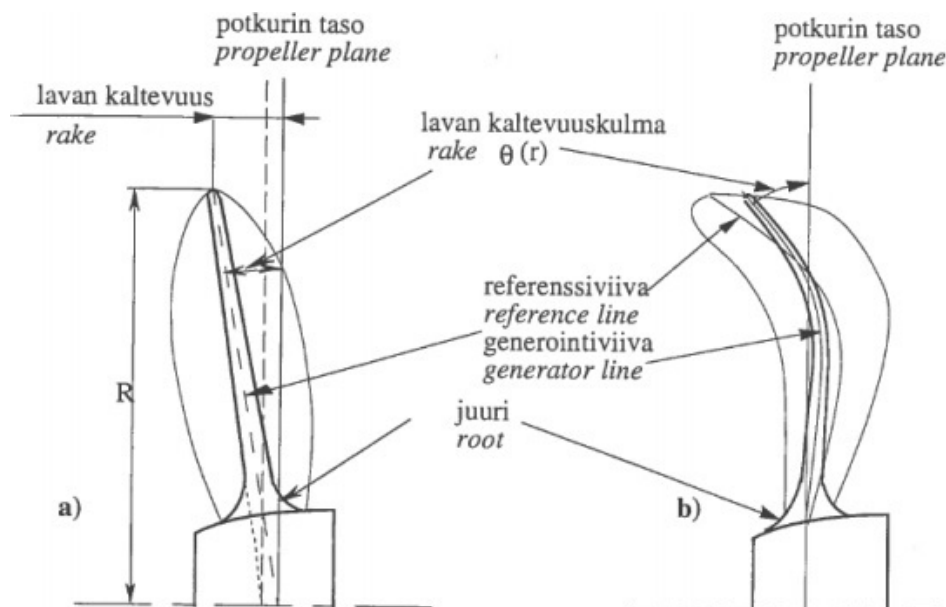
Lavan kaltevuus ja kierto (engl. rake ja skew) ovat kierteisyytensä vuoksi ristiin kytkettyjä komponentteja suhteessa potkurin akseliin nähden.

Lavan kaltevuuskulma θ_r tarkoittaa potkurilapojen kallistusta suhteessa potkurin napaan. Käytännössä tämä tarkoittaa lavan kärjestä katsottua kaltevuuden ja generointiviivan etäisyyttä. Myös potkurin tason pitkittäinen sijainti määräytyy generointiviivan ja lavan juureen leikkauspisteen mukaan. (Carlton 2007, 37; Matusiak 2005, 14-15).



Kuva 18. Sylinterimäinen leikkaus potkurista levitettynä tasoksi (Matusiak 2005, 14).

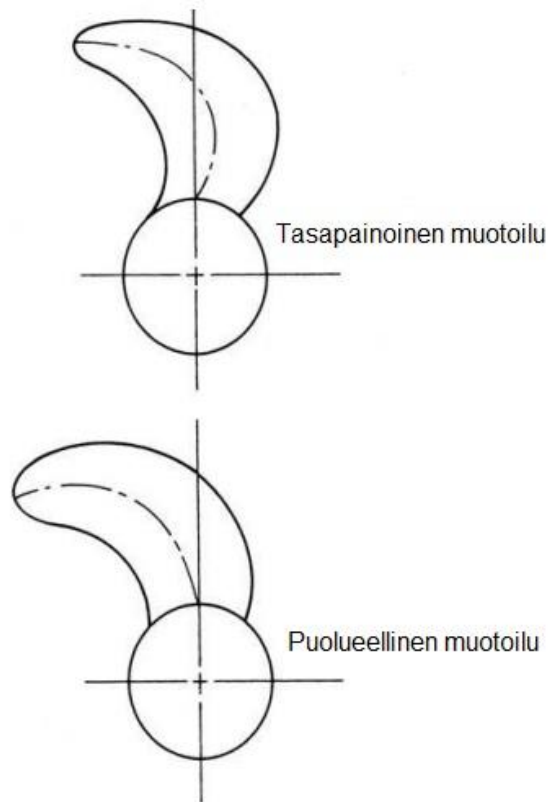
Lapojen poikkileikkauksien keskipistettä A yhdistävää viivaa kutsutaan referenssiviivaksi. Potkurin taso on suunnattu kohtisuoraan potkurin akselia vastaan, ja sen x-suuntainen sijainti määräytyy lavan referenssiviivan ja potkurin akselin leikkauspisteen mukaan. Generointiviiva on sama kuin tuon tason ja lavan keskipinnan leikkauskäyrä. Lavan kaltevuus on pitkittäinen (x-suuntainen) etäisyys lavan kärjestä generointiviivaan. (Matusiak 2005, 15.)



Kuva 19. Potkurilavan tason ja kallistuksen määrittäminen (Matusiak 2005, 15).

Potkurin kiertokulma θ_s on toinen mitoista, joka ilmaisee etäisyyden referenssiviivan ja generointiviivan välillä. Ne voidaan luokitella kahteen eri muotoilutyyppiin: tasapainoiseen- ja puolueelliseen muotoiluun (Kuva 20).

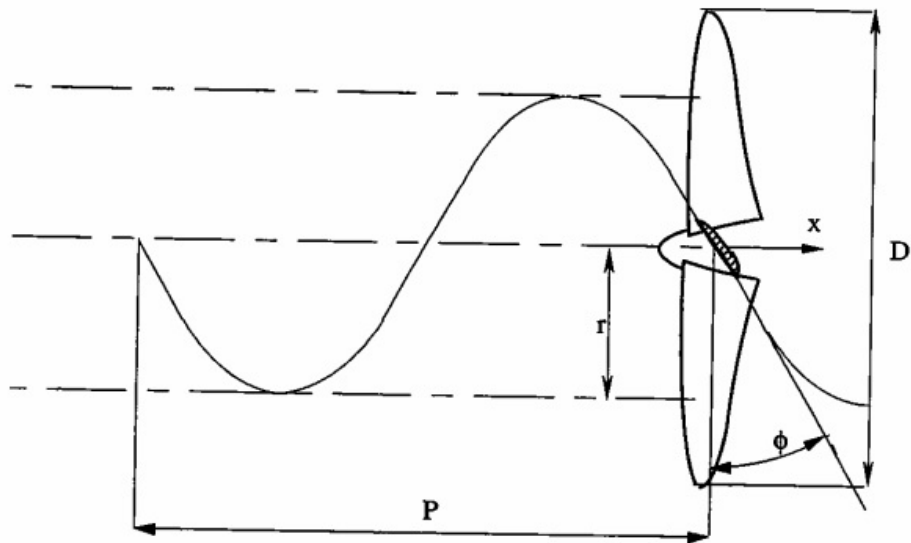
Tasapainoisessa muotoilussa lavan referenssiviiva leikkaa ainakin kahdesti potkurin generointiviivan. Puolueellisessa muotoilussa referenssiviiva leikkaa generointiviivan vain kerran. (Matusiak 2005, 17; Carlton 2007, 37.)



Kuva 20. Kierron määrittäminen (Carlton 2007, 3).

Potkurin nousulla tarkoitetaan tietyn lavassa olevan pisteen etenemistä akselin suuntaisesti yhden kierroksen aikana. Kun pisteen eteenpäin liikuttu matka on P eli potkurin nousu ja potkurin säteen ollessa r , niin voidaan nousukulma θ ilmoittaa kaavalla:

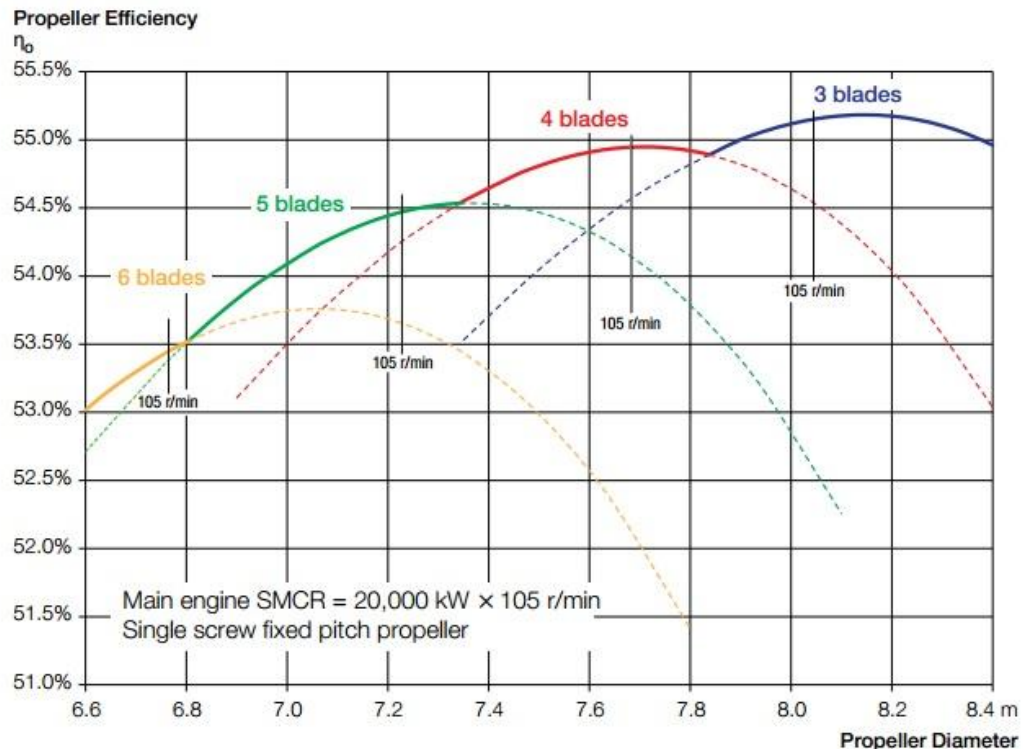
$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{P}{2\pi r} \right). (\text{Carlton 2007, 34, kaava 3.2})$$



Kuva 21. Nousun ja kulman vaikutus toisiinsa (Matusiak 2005, 14).

3.3 Lapojen määrä ja muotoilu

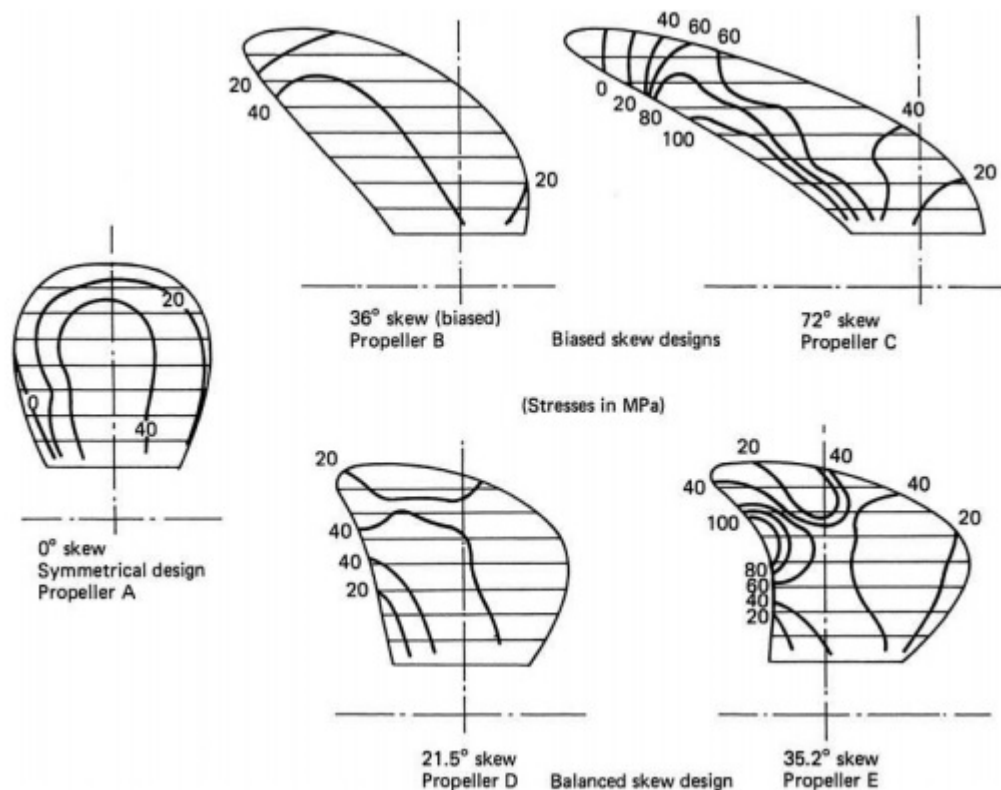
Kuten jo aiemmin mainittiin, lapojen määrä potkurissa voi vaihdella kahdesta jopa kahdeksaan. Määrään vaikuttavat potkuri- ja alustyyppin lisäksi rakenteelliset tekijät, kuten tärinä ja kavitointi. Teoriassa mitä vähemmän potkurissa on lapoja, sitä suurempi on potkurin hyötysuhde. Tätä ei aina kuitenkaan pystytä noudattamaan rakenteen riittämättömän vahvuuden johdosta. Yleensä lapojen pariton määrä aiheuttaa vähemmän värähtelyjä. Kavitoinnin minimoimiseksi lapojen määrän olisi hyvä olla mahdollisimman suuri, jolloin lapojen väliin jäämä matka olisi mahdollisimman pieni. Suuri lapojen määrä mutta myös paksuus aiheuttaa kuitenkin voimantuoton lisäksi myös vastustavaa voimaa, ja itse potkurin valmistamiskustannukset nousevat niiden mukana. Lapojen määrä ja paksuus optimoidaankin aina tapauskohtaisesti. Silloin otetaan huomioon tiedossa olevat muuttujat sekä aluksen että koko propulsioon osalta. (Carlton 2007, 47, 451-452; Man Diesel & Turbo; Bertram 2000, 39).



Kuva 22. Lapamäärän vaikutus teho - halkaisijakäyrällä. (Man Diesel & Turbo).

Muotoiluun liittyviä kokeita ja laskelmia suoritetaan tapauskohtaisesti ennen lopullista potkurin valintaa. Lapojen muotoilussa kokeissa havaittuja tietoja analysoidaan tarkasti ja säätöjä sekä muutoksia tehdään aina tarpeen mukaan. Kun halutaan esimerkiksi vähentää potkurin aiheuttamaan melua ja värähtelyä, voidaan lavan kärjen nousua keventää. Toisaalta, kun tehdään muutoksia muotoilun suhteen, samalla hyödyn lisäksi joudutaan todennäköisesti myös tinkimään jossain toisessa parametrissa. Melun ja värähtelyn kustannuksena on yleensä heikentynyt potkurin hyötysuhde. (Matusiak 2005, 87-88).

Kuvassa 23. havainnoidaan lavan muodon, tässä tapauksessa kierron, merkitystä lavan vastaanottamaan kuormaan. Esimerkistä käy ilmi mielenkiintoinen seikka koskien lapa E: vaikka lapa on kierroltaan tasapainossa, on sen vastaanottama kuorma lavan jättöreunalla melko suuri verrattuna lapaan D, joka on muotoilultaan melko samanlainen lavan E:n kanssa.



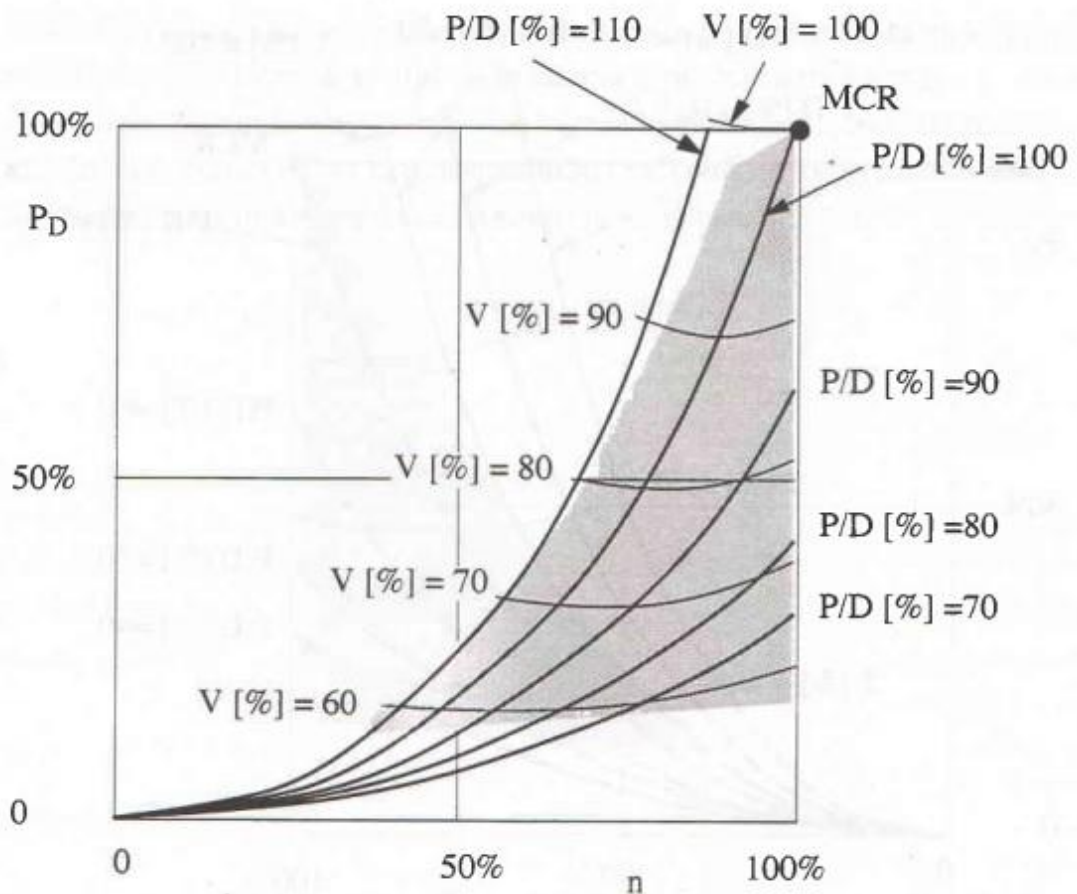
Kuva 23. Lavan muodon merkitys kuormaan. (Carlton 2007, 404).

3.4 Säätolapapotkurin geometria

Visuaalisesti vertailtaessa kiinteälapaisen- ja säätolapapotkurin geometriaa ei merkittäviä eroja ole nopeasti havaittavissa. Käytännössä säätolapapotkurin suurin eroavaisuus onkin lapojen rotaatio ja sen tuoma paineen ja virtauksen muutos sekä potkurinavan suurempi halkaisija. Potkurilapojen nousua säädettyä muuttuvat samalla myös sen hydrodynaamiset ominaisuudet. Nämä muutokset on otettava huomioon potkuria suunniteltaessa. Huomioiden potkurin tietty säätoalue, ei lapoihin saa kohdistua missään vaiheessa liian suuria negatiivisesti vaikuttavia voimia. Myöskään pinta-alasuhte aE ei saa nousta yli arvon 0.8, muuten lavat ottaisivat kiinni toisiinsa niitä säädettyä. Ei toivotutun kavitoinnin välttämiseksi joudutaan pinta-alasuhdetta aE kuitenkin nostamaan 5-10% kiinteälapaiseen potkuriin verrattuna. (Matusiak 2005, 36).

Oleellista säätolapapotkurissa ovat potkurikäyrät, joilla pystytään optimoimaan potkuri sopivalle nousulle vastaamaan pääkoneen tehokkainta toiminta- aluetta. Meriolosuhteet ja pohjan likaantuminen ovat konkreettisia syitä, jotka

muuttavat potkurin tehokasta toimintaa ja pääkoneen taloudellisuutta optimialueelta huonompaan suuntaan. Tämä koskee varsinkin kiinteälapaisia potkureita, jolloin potkuri mitoitetankin yleensä keskimääräiselle hyötysuhteelle. Säätölapapotkurissa tätä hyötysuhdetta voidaan muuttaa nousua säätämällä. Jokaisella säätölapapotkurilla varustetulla aluksella onkin omat yksilölliset potkurikäyränsä ja niitä nykyään seurataan ja varsinkin optimoidaan jatkuvasti. Tällä optimoinnilla on mahdollista päästä huomattaviin polttoainesäästöihin. (Matusiak 2005, 70-73).



Kuva 24. Diagrammi säätölapapotkurin ja pääkoneen optimoinnista. (Matusiak 2005, 71)

Kuvassa 24. havainnollistetaan potkurinousun muutoksen vaikutukset teho – nopeus diagrammilla. P/D on suhteellinen lapanousu, P_D potkurin teho, n kierrosnopeus, V on aluksen nopeus ja MCR Maximum Continuous Rating.

3.5 Aluksen aiheuttamat vastavoimat

Kun suoritetaan alustavia potkurilaskelmia, ne tehdään yleensä avovesiolosuhteissa. Aluksen perässä vaikuttava potkuri toimii kuitenkin

epästabiilissa ympäristössä. Tähän vaikuttaa pääasiassa edessä oleva aluksen runko ja sen aiheuttama veden virtauksen muutokset. Nämä muutokset ovat yleensä luonnoltaan etenemistä vastustavia ja niiden voiman määrät pyritään ottamaan huomioon mahdollisimman tarkasti. Kuten potkurille, niin myös itse aluksen rungollekin suoritetaan avovesitestejä, sekä mallikokeita ja niiden perusteella pyritään laskennallisesti määrittämään sen aiheuttama vastus. Näin saadaan tärkeää tietoa liittyen potkurin vaadittavaan suorituskyykyyn. (Matusiak 2005, 38-40).

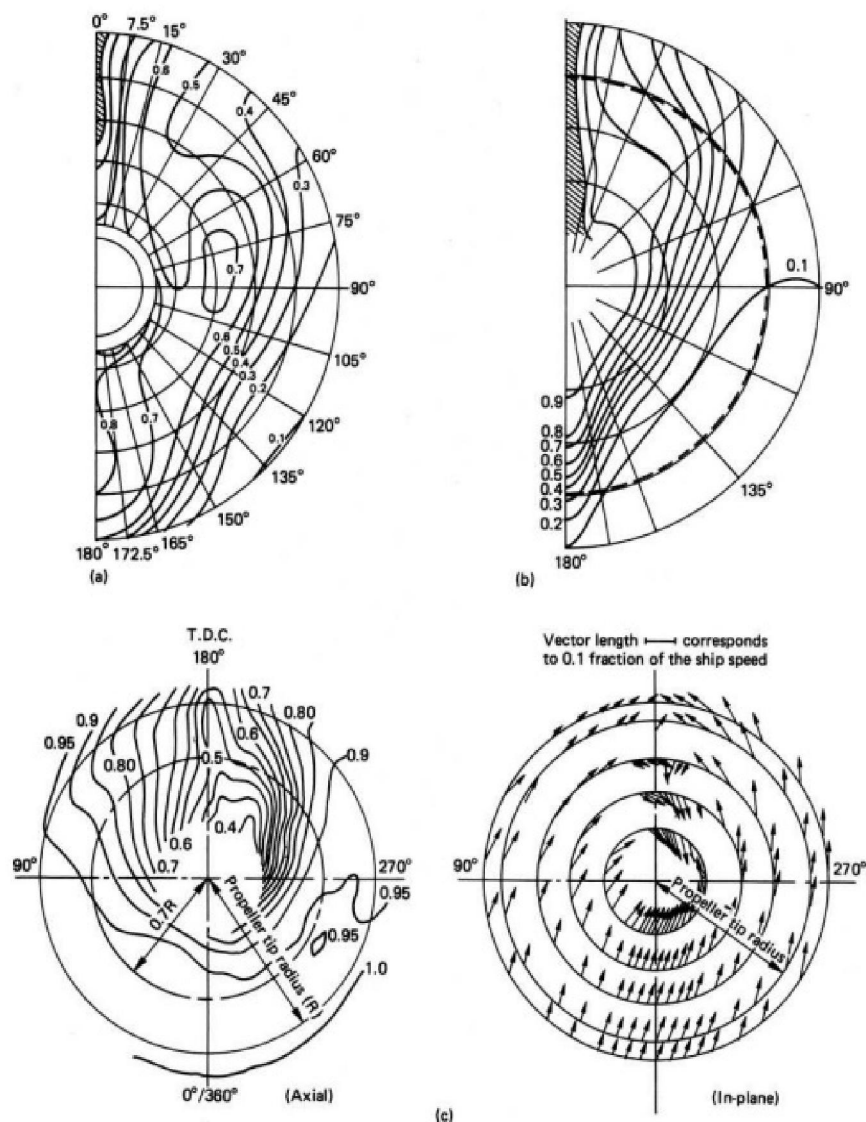
4 VANAVESI

4.1 Vanavesi etenevässä kappaleessa

Kappaleen eteneminen vedessä aiheuttaa epätasaisen pyörteitten voimakentän kappaleen perässä, jota se itse edetessään ”vetää mukanaan”. Kolme perussyötä tämän voimakentän syntymiseen on; veden virtaus kappaleen ympärillä, rajakerroksen kasvu ja mikä tahansa aallonmuodon aiheuttava komponentti. Tätä voimakenttää kutsutaan vanavedeksi, joka toimii etenemistä hidastavana elementtinä. Jotta vanaveden vaikutusta voidaan hyödyntää laskennallisena tietona, on sen määrittämiseen käytössä erilaisia menetelmiä. Yksi menetelmistä on ”nopeuden suhde” – menetelmä, missä nopeuden ääriviivat ilmaistaan osana aluksen nopeutta V_s suhteessa veden kaukokentän nopeuteen. Tällöin veden nopeus potkuritason pisteessä ilmaistaan sen aksiaalisten, tangentialisten ja radiaalisten komponenttien, v_a , v_t ja v_r avulla

$$\frac{V_a}{V_s}, \frac{V_t}{V_s} \text{ ja } \frac{V_r}{V_s}$$

(Carlton 2007, 65–67; Matusiak 2005, 42).



Kuva 25. Vanavesikentät (Carlton 2007, 66).

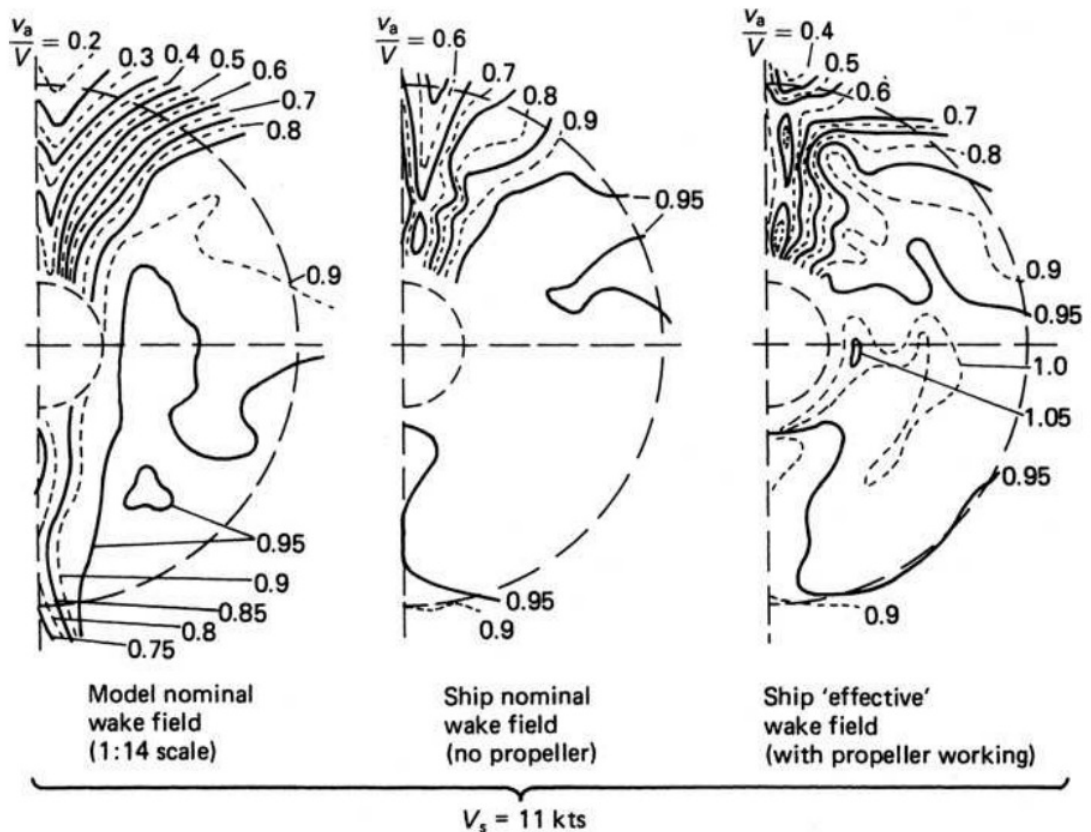
Kuvassa 25 havainnoidaan tyypillisiä vanavesikenttä. Kuvat a - ja b ovat kaksi potkurisesta aluksesta, missä a edustaa - U - muotoista ja b - V - muotoista runkoa. Kuvassa c ilmenee aksiaalinen havainnointikuva vasemmalla, ja oikealla tason mukainen vanavesikenttä. (Carlton 2007, 66.)

4.2 Vanaveden vaikutus potkuriin

Potkuriin vaikuttavan vanaveden osuus koostuu potentiaalivanavedestä, kitkavanavedestä, irtaantumisanavedestä, potkurin indusoimasta vanavedestä ja aaltovanavedestä. Potentiaalivanavesi on aluksen perässä tapahtuva virtauksen hidastuma ja se riippuu potkurin sijainnista runkoon nähden. Kitkavanavedellä tarkoitetaan rajakerroksen hidastavaa vaikutusta perää ympäröivässä virtauksessa ja jos tämä rajakerroksen hidastettu virtaus

eroaa normaalista virrasta, syntyy siitä pyörteistä virtausta ja sitä kutsutaan irtaantumisanavedeksi. Potkurin on mahdollista pienentää vanaveden negatiivista vaikutusta kiihdyttämällä virtausta ja näin torjua virtauksen irtaantumista aluksen perästä, tätä kutsutaan potkurin indusoimaksi vanavedeksi. Aaltovanavesi muodostuu nimensä mukaan aallokossa, missä veden virtaus hidastuu aallon harjalla ja vastaavasti kiihtyy pohjalla. Potkurin laskelmissa käytetään varsinaisen vanaveden vaikutuksen pyörteetöntä osaa ja siitäkin vain sen aksiaalista komponenttia. (Matusiak 2005, 42-44).

Ilman toimivaa potkuriä määritelty vanavesi on nimeltään nominaalivanavesi. Sen keskiarvo on propulsiovanavesikerrointa (ns. Taylorin eli tehollista vanavesikerrointa) suurempi ja se määritellään mallikokeiden avulla. Vanaveden laskemisessa on käytetty luotettavampana tapana mallikokeita ja niihin pohjautuvia laskukaavoja, sekä käyrästöjä. Yhä kehittyvä tietokoneiden laskentateho mahdollistaa tulevaisuudessa myös numeerisen hydrodynamiikkaan pohjautuvia laskentamenetelmiä. (Carlton 2007, 71-75; Matusiak 2005, 41-45).



Kuva 26. Mallikokeessa ja todellisuudessa havaitut vanavesikentät (Carlton 2007, 75).

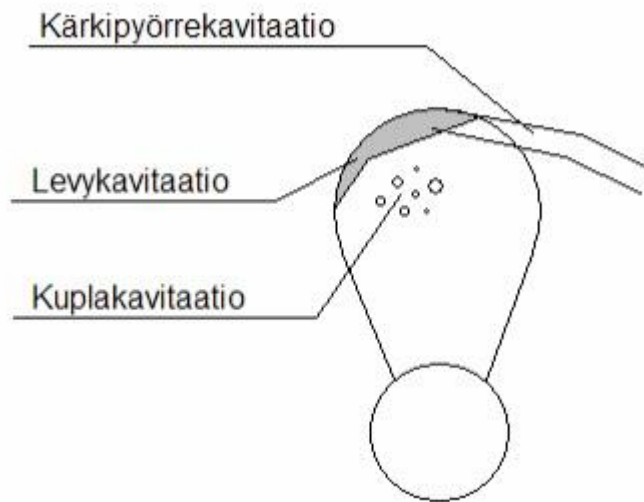
5 KAVITAATIO

5.1 Yleistä

Kavitaatio on yleinen nestemekaaninen ilmiö, joka tapahtuu aina, kun nesteen liikkeessä tapahtuu nopeus- ja painevaihteluita. Käytännössä tällaisia havaintoja voi laivalla nähdä potkurin lisäksi pumpuissa, turbiineissa ja laakereissa. Kavitaatio syntyy paineen tippuessa nesteessä alle kriittisen rajan ja on kaasufaasin muodostumista nesteessä. Paineen taas noustessa ne katoavat. Silloin ne kasvavat ja romahtavat erittäin nopeasti, varsinkin jos kaasu on täyttämässä kavitaatiokuplaa. Potkurissa pyörimisnopeus vaikuttaa oleellisesti lavan ympärillä ja varsinkin kehän ulkoreunalla tapahtuvaan kavitaatioon. Kehän kärjen nopeuden ei olisi suotavaa ylittää 35m/s. Myös potkurin geometriset ominaisuudet vaikuttavat suuresti paineiden vaihteluun, virtauksen muutokseen ja näin kavitoinnin laajuuteen. Hydrostaattisesta paineesta johtuen kokonaispaine on aina suurempi potkurilavan ollessa syvimmällä. Lavan ollessa lähempänä pintaa paine on tällöin pienempi ja kavitaatioherkempi. Tällä nopeasti tapahtuvalla ilmiöllä on monia negatiivisia vaikutuksia, kuten:

- Tärinä.
- Eroosiot potkurissa ja sen ympäristössä.
- Työnnön väheneminen.
- Potkurimelu. (Carlton 2007, 207; Bertram 2001, 51; Matusiak 2005, 85).

5.2 Kavitaatiolajit

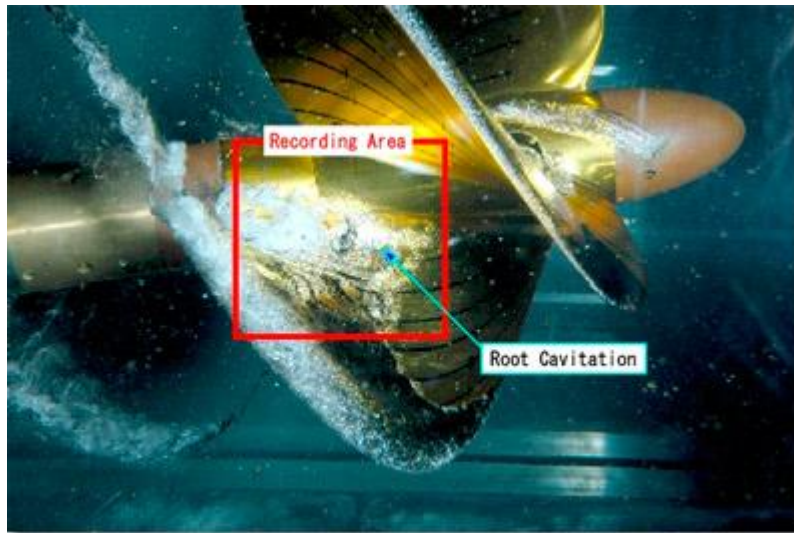


Kuva 27. Kavitaatiolajit potkurissa (Merivoimien Apualuksen Propulsiojärjestelmä ja Sen Kehitysmahdollisuudet).

Levykavitaatiota tapahtuu yleensä lavan etureunassa ja ilmenee ohuena lasimaisena kerroksena sisältäen höyryn, kaasun ja veden seoksen.

Kavitaation epäillään aiheuttavan eroosiota sen tapahtuessa lavan painepuolella. Levykavitaatio aiheuttaa syntyessään haitallista värähtelyä, sekä melua. Kavitaation määrä on riippuvainen aluksen perän muotoilusta ja sen vaikutuksesta vanaveden tasaisuuteen. Mitä vähemmän vanavedessä tapahtuu nopeuden muutoksia, sitä vähemmän tapahtuu levykavitaatiota.

Tämä on yleinen kavitaatiolaji säätölapapotkureissa, missä nousu on pieni ja potkurin kierrosnopeus suuri. Säätölapapotkureille myös yleinen kavitaatiolaji on juurikavitaatio ja siihen liittyy vakavia navan ja lapojen syöpymistä. (RANS Analyses of Cavitating Propeller Flows; Matusiak 2005, 83, 93).



Kuva 28. Esimerkki juurikavitaatiosta. (Corvex Pumps).

Levykavitaation tilavuuden muutokset ja siihen liittyvät hydrodynaamiset paineet yhdessä voimakkaan pyörteilyn kanssa liittyvät kuplakavitaatioon, joka tunnetaan myös pilvikavitaationa. Nämä kuplat hakeutuvat alueelle missä korkein paine sillä hetkellä vallitsee ja hajoavat sitten erittäin nopeasti aiheuttaen painepulsseja. Nämä pulssit aiheuttavat meluhaittoja ja eroosiota. (Matusiak 2005, 82-83).

Potkurilavan etureunassa voi havaita urakavitaatiota, joka on eräänlainen kuplakavitaation muoto. Urakavitaation esiintymistä aiheuttaa lavan pinnan epätasaisuus ja likaisuus. (RANS Analyses of Cavitating Propeller Flows.)

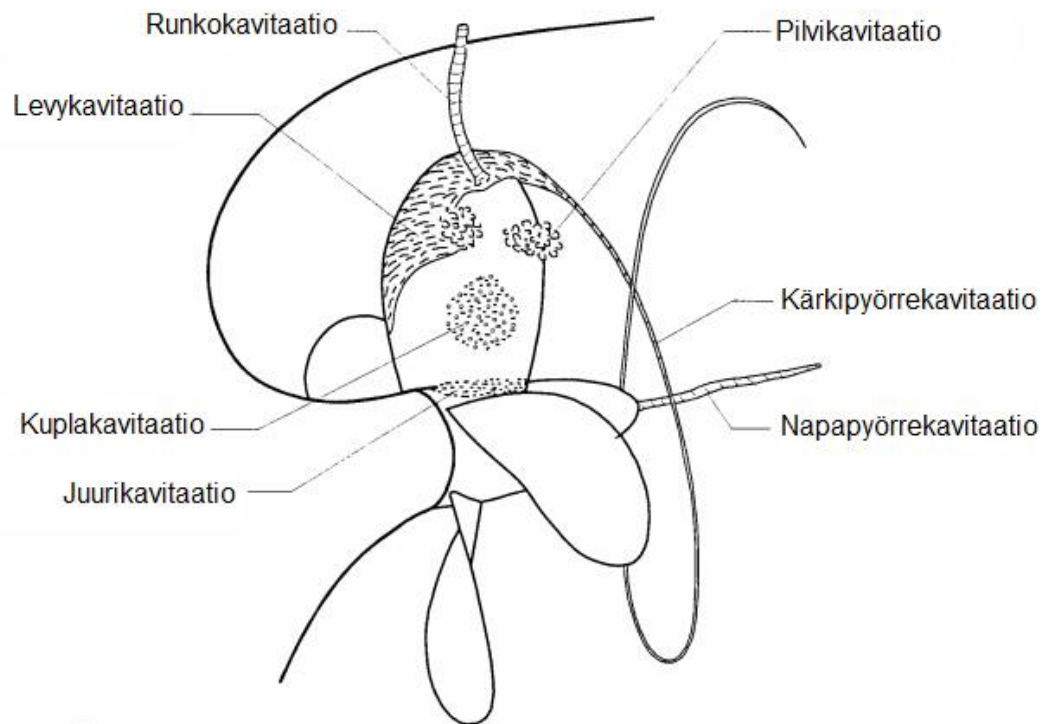


Kuva 29. Urakavitaation muodostumista (ITTC).

Pyörrekavitaatiota ilmenee pyörteen matalapaineen keskuksessa ja ITTC:n (International Towing Tank Conference) mukaan se jaetaan viiteen eri kategoriaan:

- Takareunan kavitaatioon (Eng. Trailing tip vortex)
- Johtoreunan kavitaatioon (Eng. Leading edge vortex)
- Kärkipyörrekavitaatioon (Eng. Attached tip vortex)
- Runkokavitaatioon (Eng. Propeller-hull vortex (PHV))
- Napapyörrekavitaatioon (Eng. Hub vortex)

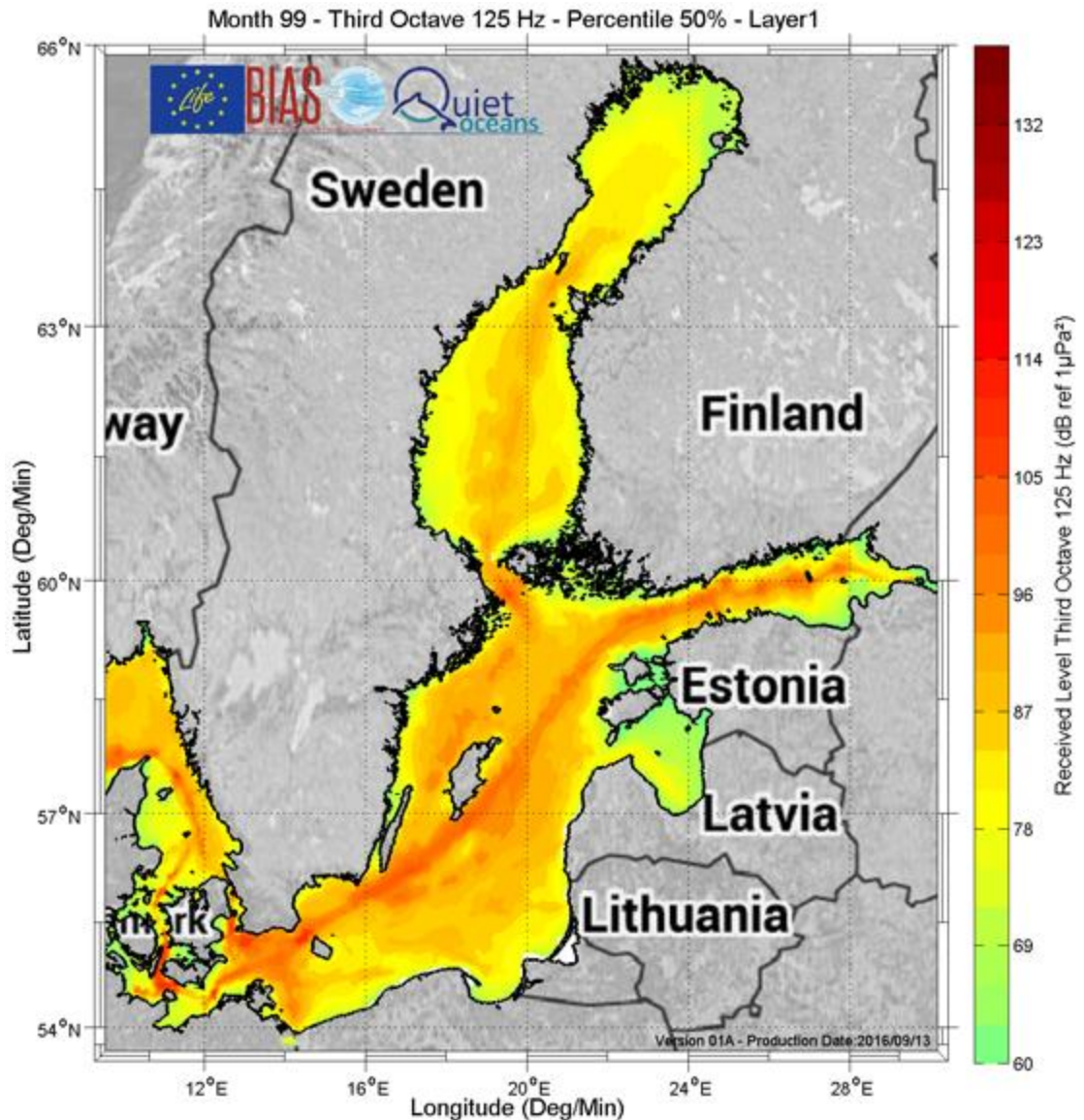
Nämä ovat yleisimmin havaittuja kavitaatiomuotoja ja koskivat pääasiassa kiinteälapaisia potkureita. Liittyen tämän työn muihin potkurityyppeihin mainittakoon vielä säätölapapotkurin lapamutterin aiheuttama kavitaatio ja suulakepotkurin kärjessä tapahtuva pyörrekavitaatio, jotka ovat näille potkureille tyypillisiä kavitaatiomuotoja. (ITTC).



Kuva 30. Kavitaatiolajeja (ITTC).

5.3 Potkurimelu

Edellä mainittiin erilaisia kavitaation muotoja, sekä niiden aiheuttamia vaikutuksia potkuriin, joita ollaan pystytty havainnoimaan jo kautta historian. Potkurin aiheuttama melu ja vedenalainen ääni on aiemmin havaittu haitallisena tekijänä sotateknologiassa. Vuonna 2012 Suomen Ympäristöministeriön tekemän päätöksen mukaan myös vedenalaisen melun aiheuttamia ongelmia vesieliöille alettiin vasta tutkimaan kunnolla erillisellä BIAS – hankkeella (Baltic Sea Information on the Acoustic Soundscape). Nykyään potkurimelun on havaittu aiheuttavan ongelmia vesistöjen ekosysteemille koko laajuudessaan. Matalataajuisen potkurimelun on arveltu häiritsevän vesieliöiden suunnistusta, viestintää ja lisääntymistä. Havaittujen ongelmien vuoksi asia on viety käsittelyyn kansainväliseen merenkulkujärjestöön IMO:n, missä on tarkoituksena asettaa rajoitteita ja määräyksiä vedenalaisen melun aiheuttamiseksi. (Suomen merenhoitosuunnitelman toimenpideohjelma 2016-2021, 95-99).



Kuva 31. Itämeren äänikartta (Syke)

Kuvasta 31 käy selkeästi ilmi käytetyimmät laivaväylät vuodelta 2014.

6 VTT

Suomessa tehdään paljon tutkimustyötä liittyen potkureiden ja alusten optimointiin eri olosuhteissa. Varsinkin arktinen merenkulku on nykyään globaalisti merkittävä haaste ja sen tuomia ongelmia, sekä ratkaisuja tutkitaan laajalti esimerkiksi Valtion Teknologian Tutkimuskeskus VTT Oy:ssä.

Meriteknikan tutkimuksia on suoritettu VTT:ssä vuodesta 1975 lähtien ja on siitä saakka ollut edelläkävijä teoreettisten ja laskennallisten menetelmien osa-alueella. VTT on suorittanut kokeita niin merellä, kuin myös heidän koealtaassa. Mallikoelaitos sisältää hinaus- ja ohjauslaitteet, missä tutkittavien

kohteiden hydrodynaamisia ominaisuuksia voidaan havainnoida eri olosuhteissa. Mallikoelaitoksen tuottamien tulosten ja tietokoneohjelmien avulla VTT on yksi maailman johtavista tutkimuslaitoksista. Varsinkin arktisessa merenkulussa, mutta myös erilaisissa energiaratkaisuissa on tietoa pysytty hankkimaan niin laajalti, että se vaikuttaa koko laivateollisuudessa. (VTT impulssi).



Kuva 32. VTT:n hinausallas koeajoja varten (VTT impulssi).

7 YHTEENVETO

Aluksen eteenpäin työntävä voima tuotetaan pääasiassa polttomoottoreilla, joista se välitetään akselin kautta potkuriin ja veteen. Tämän ymmärtäminen on aluksi helppoa. Perehtymällä enemmän aiheeseen ilmiöt, voimien tunnistaminen ja niiden kokonaisvaikutukset muuttuvatkin todella monimutkaiseksi ja laajaksi kokonaisuudeksi. Näiden vaikuttavien asioiden ymmärtäminen vaatii yksityiskohtaista selvittämistä aihe kerrallaan.

Tämän työn kautta nämä asia erottuvat helpommin toisistaan ja laajempi perehtyminen on näin mahdollista. Tarkoitus on auttaa lukijaa havainnoimaan syitä ja seurauksia potkurin ja koko aluksen osalta eri olosuhteissa.

Tavoitteet tämän työn osalta mielestäni saavutettiin ja hankitun tiedon rajaaminen tiiviiseen pakettiin edesauttaa saamaan aiheeseen liittyvää tarkempaa ja päivitettyä tietoa. Aihe on monin tavoin mielenkiintoinen myös ammattikunnan ulkopuolella. Varsinkin potkurimelun havaitut vaikutukset ympäristössä ja sen tuomat haasteet ovat voimakkaasti mukana tulevaisuuden muotoilussa ja kehityksessä. Arktiset olosuhteet ovat toinen voimakkaasti kasvava kiinnostuksen aihe merenkulussa ja se vaatii myös uusia innovaatioita jatkossa.

LÄHTEET

Bertram, V. 2000. Practical Ship Hydro Dynamics. Woburn: Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier.

Carlton, J.S. 2005. Marine Propellers and Propulsion. 2. Painos. Burlington: Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier.

Ghose, J.P.&Gokarn, R.P. 2004. Basic Ship Propulsion. New Delhi: Allied publishers Pvt. Limited.

ITTC. Urakavitaation muodostumista. Pdf-dokumentti saatavissa: <https://itc.info/media/2047/75-02-03-032.pdf> [Viitattu 24.10.2017].

Man Diesel& Turbo. Basic Principles of Ship Propulsion. Saatavissa: <https://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/propeller-aftship/basic-principles-of-propulsion.pdf?sfvrsn=0>[Viitattu 31.10.2017].

Matusiak, J. 2005. Laivan propulsio. 6. painos. Espoo: Teknillinen korkeakoulu.

Nasa. Newtonin kolmas laki. Saatavissa: <https://wright.nasa.gov/airplane/newton3.html> [Viitattu 30.10.2017].

RANS Analyses of Cavitating Propeller Flows. Pdf-dokumentti saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/science/2012/S22.pdf>[Viitattu: 24.10.2017].

Standford Encyclopedia of Philosophy. Saatavissa: <https://plato.stanford.edu/entries/archytas/> [Viitattu: 20.04.2017].

Ympäristöministeriön raportteja, 5/2016. Suomen merenhoitosuunnitelman toimenpideohjelma 2016-2021.

VTT Impulssi. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/Impulssi/Pages/Laivateollisuuden-digitalisoituminen-edellytt%C3%A4%C3%A4-huippututkimusta.aspx> [Viitattu 1.11.2017].

Wärtsilä Technical Journal. Saatavissa: <http://cdn.wartsila.com/docs/default-source/product-files/gears-propulsors/waterjets/article-id-2011-02-waterjet824b894a7f0f601bb10cff00002d2314.pdf?sfvrsn=4> [Viitattu 20.04.2017].

KUVALUETTELO

Kuva 1. Archytaksen lintu. Understanding the history and Evolution of Robotics. Saatavissa: <http://www.33rdsquare.com/2015/11/understanding-history-and-evolution-of.html>. [Viitattu: 19.04.2017].

Kuva 2. Archimedeeseen ruuvi. Screw pump basics. Saatavissa: <http://empoweringpumps.com/screw-pump-basics/>. [Viitattu 20.04.2017].

Kuva 3. Hooken ruuvipotkuri. Carlton, J.S.2007.

Kuva 4. Bernoullin potkuri. Carlton, J.S.2007.

Kuva 5. Ericssonin vastakkainpyörivä potkuri. Carlton, J.S. 2007.

Kuva 6. Archimedeeseen potkuri. Carlton, J.S. 2007.

Kuva 7. Lowenirroitettavatpotkurilavat. Lowe's Forms of Curved Blades for Propelling. Saatavissa: <http://www.epsomandewellhistoryexplorer.org.uk/Lowe.html> [Viitattu: 21.04.2017]

Kuva 8. Napoleon-laivan potkuri. Carlton, J.S. 2007.

Kuva 9. Mallorynruoripotkuri. Antique Print of the Mallory Propeller – 1878. Saatavissa: <https://www.etsy.com/listing/288757633/antique-print-of-the-mallory-propeller> [Viitattu:21.04.2017]

Kuva 10. Kirsten-Boeing potkuri. N.A.C.A. Saatavissa: <https://patentimages.storage.googleapis.com/pages/US2030375-1.png> [Viitattu: 18.04.2017].

Kuva 11. Suulakepotkuri. Combined Device of a Ship's Propeller Enclosed by a Nozzle. Saatavissa: <https://patentimages.storage.googleapis.com/pages/US2030375-1.png> [Viitattu: 23.05.2017].

Kuva 12. Kuvaus ruuvipotkurista. Matusiak, J. 2005.

Kuva 13. Potkurin pintageometria. Matusiak, J. 2005.

Kuva 14. Laivan runkoon vaikuttavat hydrodynaamiset voimat. Matusiak, J. 2005.

Kuva 15. Laivan potkuriin vaikuttavat voimat. Matusiak, J. 2005.

Kuva 16. Työntövoiman vähennyskertoimia. Carlton, J.S. 2007.

Kuva 17. Potkurin ja rungon vaikutukset toisiinsa Matusiak, J. 2005.

Kuva 18. Sylinterimäinen leikkaus potkurista levitettynä tasoksi. Matusiak, J. 2005.

Kuva 19. Potkurilavan tason ja kallistuksen määrittäminen. Matusiak, J. 2005.

Kuva 20. Kierron määrittäminen. Carlton, J.S. 2007.

Kuva 21. Nousun ja kulman vaikutus toisiinsa. Matusiak, J. 2005.

Kuva 22. Lapamäärän vaikutus teho - halkaisijakäyrällä. Man Diesel & Turbo.

Kuva 23. Lavan muodon merkitys kuormaan. Carlton, J.S. 2007.

Kuva 24. Diagrammi säätölapapotkurin ja pääkoneen optimoinnista. Matusiak, J. 2005.

Kuva 25. Vanavesikentät. Carlton, J.S. 2007.

Kuva 26. Mallikokeessa ja todellisuudessa havaitut vanavesikentät. Carlton, J.S. 2007.

Kuva 27. Kavitaatiolajit potkurissa. Merivoimien Apualuksen Propulsiojärjestelmä ja Sen Kehitysmahdollisuudet. Saatavissa: <https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/74277/SM277.pdf?sequence=1> [Viitattu 23.10.2017].

Kuva 28. Esimerkki juurikavitaatiosta. Corvex Pumps. Saatavissa: <http://corvexpumps.com/News.html> [Viitattu: 24.10.2017].

Kuva 29. Urakavitaation muodostumista. ITTC. Pdf-dokumentti saatavissa: <https://itc.info/media/2047/75-02-03-032.pdf> [Viitattu: 24.10.2017].

Kuva 30. Kavitaatiolajeja. ITTC. Pdf-dokumentti saatavissa: <https://itc.info/media/2047/75-02-03-032.pdf> [Viitattu: 24.10.2017].

Kuva 31. Itämeren äänikartta. Syke. Saatavissa: [http://www.syke.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Tiedotteet/Itameren_vedenalainen_melu_riski_kaloill\(41549\)](http://www.syke.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Tiedotteet/Itameren_vedenalainen_melu_riski_kaloill(41549)) [Viitattu 15.11.2017].

Kuva 32. VTT:n hinausallas koeajoja varten. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/Impulssi/Pages/Laivateollisuuden-digitalisoituminen-edellytt%C3%A4%C3%A4-huippututkimusta.aspx> [Viitattu 1.11.2017].